

VTT Technical Research Centre of Finland

Recommendations for the rational methods of weak water saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering water-saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering

Rathmayer, Hans; Gersevanov, N.M.

Published: 01/01/1984

Document Version
Publisher's final version

License
CC BY

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Rathmayer, H., & Gersevanov, N. M. (Eds.) (1984). *Recommendations for the rational methods of weak water saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering water-saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering*. VTT Technical Research Centre of Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedotteita No. 389



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

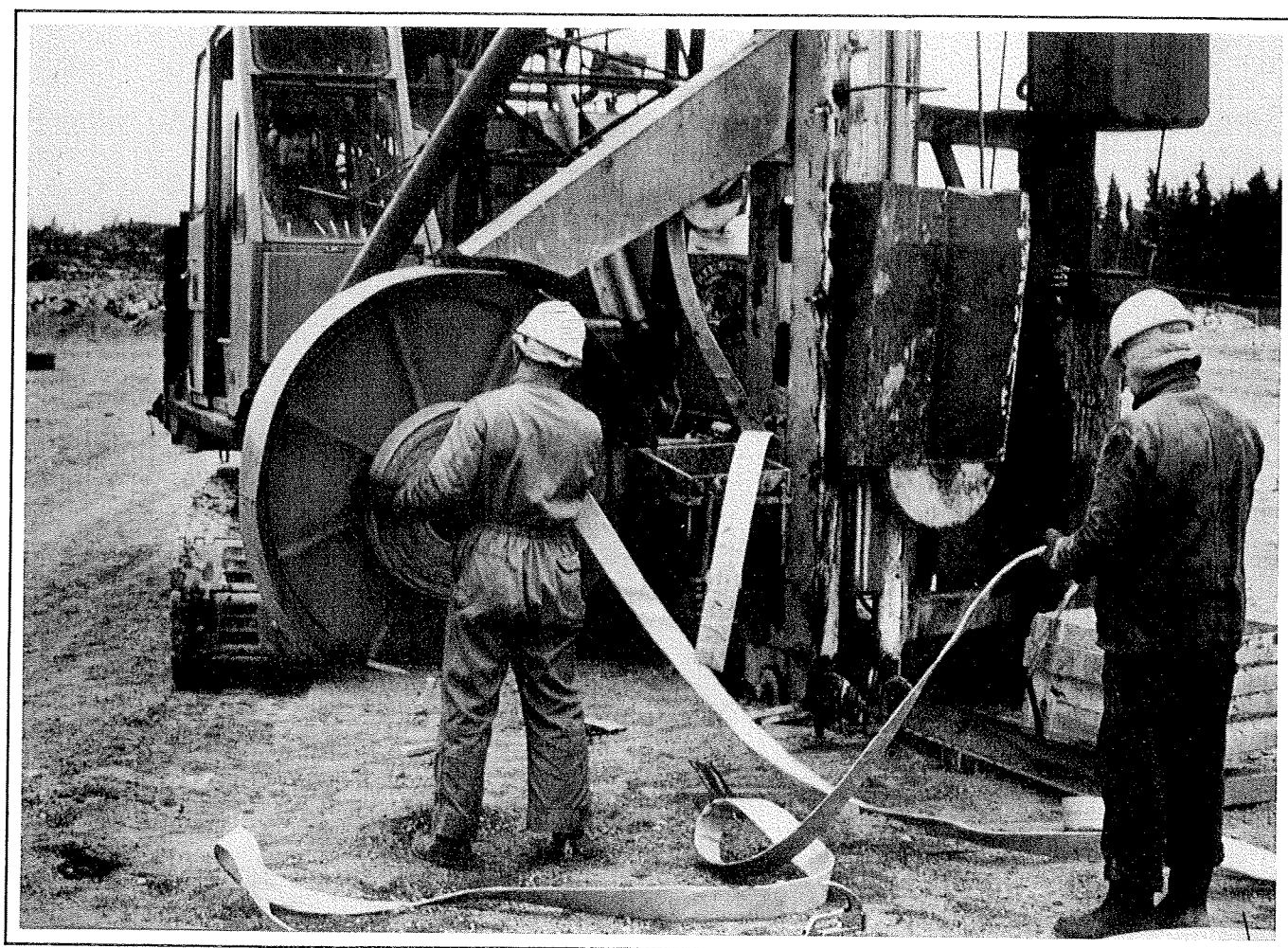
I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Recommendations for the rational methods of
weak water-saturated subsoils compaction by vertical
drains in bases and foundation engineering

Рекомендации по рациональным методам
уплотнения слабых водонасыщенных грунтов
с помощью вертикальных дрен для устройства
оснований и фундаментов





Recommendations for the rational methods of
weak water-saturated subsoils compaction by vertical
drains in bases and foundation engineering

Рекомендации по рациональным методам
уплотнения слабых водонасыщенных грунтов
с помощью вертикальных дрен для устройства
оснований и фундаментов

Technical Research Centre of Finland,
Geotechnical Laboratory

GOSSTROY, NIIOSP,
Research Institute of Bases and Underground Structures

Государственный технический научно-исследовательский центр
Лаборатория Геотехники

ГОССТРОЙ, НИИОСП
Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений

ISBN 951-38-2186-2

ISSN 0358-5085

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1984

Julkaisija – Utgivare – Publisher

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, 02150 Espoo 15
puh. vaihde (90) 4561, teleks 122972 vttha sf

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, 02150 Esbo 15
tel. växel (90) 4561, telex 122972 vttha sf

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, SF-02150 Espoo 15, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telex 122972 vttha sf

VTT, Geotekniikan laboratorio, Lämpömiehenkuja 2 B, 02150 Espoo 15
puh. vaihde (90) 4561

VTT, Geotekniska laboratoriet, Värmemansgränden 2 B, 02150 Esbo 15
tel. växel (90) 4561

VTT, Geotechnical Laboratory, Lämpömiehenkuja 2 B, SF-02150 Espoo 15, Finland
phone internat. + 358 0 4561

Recommendations for the rational methods of weak water-saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering — Рекомендации по рациональным методам уплотнения слабых водонасыщенных грунтов с помощью вертикальных дренажей для устройства оснований и фундаментов [Suositukset pehmeiden vedenkylästämiä maapohjien parantamiseksi pystyjoilla]. Espoo 1984. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita — Statens tekniska forskningscentral, Meddelanden — Technical Research Centre of Finland, Research Notes 389. 83 p./c./s.

UDC 624.137/.138

Key words consolidation, stabilization, water saturated soils, preloading, vertical drainage, deep stabilization, lime columns, recommendations, subsoils, compactions

ABSTRACT

The results of the team investigations which were carried out by Soviet and Finnish specialists on the consolidation and stabilization of weak water-saturated soils by using preloading, vertical drainage and deep stabilization by lime columns are the basis for the recommendations. The main part of the investigations has been performed in Finland, in Helsinki, alongside with the experience of subsoil consolidation and stabilization by vertical drainage and installation of lime stabilized columns, gained by Soviet and Finnish specialists when developing new territories for dwellings and industrial areas on weak water-saturated subsoils, while preparing these recommendations. Also the experience gained of the development of peat areas has been applied to this recommendations.

Recommendations for the rational methods of weak water-saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering — Рекомендации по рациональным методам уплотнения слабых водонасыщенных грунтов с помощью вертикальных дрен для устройства оснований и фундаментов [Suositukset pehmeiden vedenkyllästämien maapohjien parantamiseksi pystyjojilla]. Espoo 1984. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita — Statens tekniska forskningscentral, Meddelanden — Technical Research Centre of Finland, Research Notes 389. 83 p./c./s.

UDC 624.137/.138

Key words consolidation, stabilization, water saturated soils, preloading, vertical drainage, deep stabilization, lime columns, recommendations, subsoils, compactions

РЕЗЮМЕ

В основу рекомендаций положены результаты совместных исследований, выполненных финскими и советскими специалистами по уплотнению и стабилизации слабых водонасыщенных грунтов с применением предварительного нагружения и глубинной стабилизации известковыми колоннами.

Основная часть исследований была выполнена на территории Финляндии в Хельсинки. Вместе с тем при подготовке этих рекомендаций был использован опыт по уплотнению и стабилизации слабых грунтов с использованием вертикального дренажа и устройств колонн, стабилизированных известью, приобретенной советскими и финскими специалистами при освоении новых территорий для гражданского и промышленного строительства на слабых водонасыщенных грунтах. При подготовке этих рекомендаций был использован также опыт, приобретенный при освоении заболоченных территорий.

Recommendations for the rational methods of weak water-saturated subsoils compaction by vertical drains in bases and foundation engineering — Рекомендации по рациональным методам уплотнения слабых водонасыщенных грунтов с помощью вертикальных дренажей для устройства оснований и фундаментов [Suositukset pehmeiden vedenkyllästämien maapohjien parantamiseksi pystyjoilla]. Espoo 1984. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita — Statens tekniska forskningscentral, Meddelanden — Technical Research Centre of Finland, Research Notes 389. 83 p./c./s.

UDC 624.137/.138

Key words consolidation, stabilization, water saturated soils, preloading, vertical drainage, deep stabilization, lime columns, recommendations, subsoils, compactions

TIIVISTELMÄ

Suositukset perustuvat suomalaisten ja neuvostoliittolaisten pohjarakennusalan asiantuntijoiden tekemiin tutkimuksiin. Niissä selvitettiin esikuormituksen, pystyjoituksen ja kalkkipilareiden käyttökelpoisuutta pehmeiden, vedenkyllästämien maapohjien konsolidaation nopeuttamiseen ja kantavuuden parantamiseen. Pääosa suositusten pohjana olevista tutkimuksista tehtiin Suomessa Helsingin seudulla. Myös muita kokemuksia teollisuus- ja asuntoalueiden rakentamisesta pehmeille maapohjille hyödynnettiin suositusten laadinnassa. Esitetään myös suosituksia turvemaapohjien parantamiseksi esikuormituksella ja pystyjoituksella.

PREFACE

These recommendations for the rational method of improving weak water-saturated subsoils by preloading, vertical drainage and deep stabilization with lime columns were prepared by Soviet and Finnish specialists in accordance with the working programme of cooperation between Finland and the Soviet Union in the field of building construction on the theme "Design and Construction of Foundations on Weak Soils".

The Soviet part of the recommendations was prepared by the Institute of Bases and Underground Structures, NIIOSP, namely by N. M. Gersevanov, Gosstroy (P. A. Konovalov, Cand.Sc., Senior Researcher, Laboratory Head, A. S. Stroganov, Dr.Sc. and Yu. K. Ivanov, Cand.Sc., Senior Researcher) and Glav-Leningradstroy (Yu. N. Platonov, Vice-Director, Cand.Sc.). The Finnish part of the recommendations was prepared by H. Rathmayer, Civ.Eng., Technical Research Centre of Finland, under the supervision of the Finnish Cooperation Group, Professor K-H. Korhonen as the chairman, Usko Anttikoski, Civ.Eng., Reino Hiltunen, Civ.Eng., M. O. Juhola, Civ.Eng., Asko Kelkka, Civ.Eng., Jaakko Koppinen, Civ.Eng., Nikolai Solovjew, Civ.Eng. as members and Professor Markku Tammirinne as secretary of the group.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Рекомендации по рациональным методам уплотнения слабых водонасыщенных грунтов путем предварительного нагружения с использованием вертикального дренажа и глубиной стабилизации известковыми колоннами были подготовлены совместно советскими и финскими специалистами в соответствии с рабочей программой по теме "Устройство фундаментов в сложных геологических условиях".

Советская часть Рекомендаций была подготовлена НИИОСП им. Герсевича Н. М., Госстроя СССР (П.А. Коновалов, докт. техн. наук, рук.лаб. и Ю. К. Иванов, к.т.н., с.н.с.) и Главленинградстроем (Ю. Н. Платонов, зам. директора, к.т.н.).

Финская часть рекомендаций подготовлена инж. Х. Ратмайером, Технический исследовательский центр Финляндии Лаборатория геотехники, под руководством финской группы по сотрудничеству. К-Х. Корхонен, проф. (руководитель делегации), члены: Уско Анттикоски, дипл.инж., Рейно Хилтунен, дипл. инж., М.О. Юмала, дипл. инж., Аско Келкка, дипл. инж., Яакко Коппинен, дипл.инж., Николай Соловьев, дипл.инж., Маркку Тамминен, проф., секретарь.

ALKUSANAT

Suosituksset heikkojen, veden kyllästämiä maapohjien parantamiseksi esikuormituksella, pystyöjituksella ja kalkkipila-reilla on laatinut suomalais-neuvostoliittolainen rakennus-alan teknillis-tieteellinen asiantuntijaryhmä "Perustusten suunnittelu ja rakentaminen heikolle maapohjalle".

Neuvostoliiton puolelta vastuuorganisaationa on toiminut GOSSTROYn alainen Gersevanovin nimeä kantavan instituutin heikkojen maaperien tutkimuksen laboratorio, NIIOSP. Suositusten laadintaan ovat osallistuneet teknisten tieteiden kandidaatti, vanhempi tutkija ja laboratorionjohtaja P. A. Konovalov, teknisten tieteiden tohtori A. S. Stroganov ja teknisten tieteiden kandidaatti, vanhempi tutkija Yu. K. Ivanov NIIOSP:sta sekä tekn. tieteiden kandidaatti, varajohtaja Yu. N. Platonov Glavleningradstroista.

Suomen puolelta suositusten käytännön laadinnasta on vastannut Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) geotekniikan laboratoriosta dipl.ins. Hans Rathmayer. Työtä on ohjannut suomalainen asiantuntijaryhmä, minkä puheenjohtajana toimii prof. K-H. Korhonen, jäsenenä dipl.ins. Usko Anttikoski, dipl.ins. Reino Hiltunen, dipl.ins. M. O. Juhola, dipl.ins. Asko Kelkka, dipl.ins. Jaakko Koppinen ja dipl.ins. Nikolai Solovjew sekä sihteerinä prof. Markku Tammirinne.

TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND
Geotechnical Laboratory

GOSSTROY, USSR/NIIOSP
Research Institute of Bases and Underground Structures

RECOMMENDATIONS FOR THE RATIONAL METHODS OF WEAK
WATER-SATURATED SUBSOILS COMPACTION BY VERTICAL
DRAINS IN BASES AND FOUNDATION ENGINEERING

Finnish-Soviet Commission for Scientific
and Technological Cooperation.

Working group in the field of construction.
Expert group 1.2 : Design and construction
of foundations on weak soils.

Moscow 1984

Espoo 1984

CONTENTS

	Page
ABSTRACT	3
PREFACE	6
CONTENTS	10
1 GENERAL POSITIONS.....	12
1.1 Field of distribution of these recommendations.....	12
1.2 Basic symbols and units.....	13
1.2.1 Physical properties of soils.....	13
1.2.2 Strength and deformability properties of soils.....	14
2 SUBSOILS DEMANDING ADDITIONAL MEASURES TO IMPROVE THEIR PROPERTIES PRIOR TO CONSTRUCTION.....	16
3 PECULIARITIES OF SUBSOIL INVESTIGATIONS.....	17
3.1 Sampling.....	17
3.2 Peculiarities of laboratory testing of weak water-saturated soils.....	19
4 MEASURES TO IMPROVE SUBSOILS PRIOR TO CONSTRUCTION.....	20
4.1 Consolidation of subsoil prior to construction by preloading.....	20
4.1.1 Types of preloads.....	20
4.2 Consolidation of subsoil prior to construction by preloading combined with vertical drainage.....	20
4.2.1 Field of application of vertical drainage.....	20
4.2.2 Sand drains.....	21
4.2.3 Prefabricated drains.....	22

4.3	Improvement of subsoil prior to construction by deep stabilization with lime stabilized soil columns.....	22
5	PECULIARITIES OF CALCULATING TOTAL SETTLEMENTS AND RATE OF SETTLEMENT FOR SUBSOIL IMPROVEMENT WITH VERTICAL DRAINAGE.....	25
5.1	Calculation of settlements and time of consolidation when deep stabilization with lime columns is used.....	34
5.1.1	Total settlements.....	34
5.1.2	Case A.....	34
5.1.3	Case B.....	37
5.1.4	Settlement rate.....	38
5.2	Material requirements.....	40
5.2.1	Sand for sand drains.....	40
5.2.2	Prefabricated drains.....	40
6	ARRANGEMENT OF WORKS FOR CONSOLIDATION OR STABILIZATION OF WEAK WATER-SATURATED SUBSOILS BY VERTICAL DRAINAGE AND DEEP STABILIZATION.....	41
6.1	Vertical drainage works.....	41
6.2	Deep stabilization by the lime column method.....	43
6.3	Production of works for the installation of vertical drains in water.....	44

1 GENERAL POSITIONS

1.1 Field of distribution of these recommendations

The present recommendations include the methods of consolidating and stabilizing weak water-saturated soils in such cases, where the foundations cannot be erected until strength and deformability properties of the subsoil are improved prior to construction.

The recommendations given are based on the Soviet Construction Rules regulating the principles for design of bases and foundations.

These recommendations should be taken into consideration in both the design and the production stages, when consolidation or stabilization of weak, water-saturated subsoils simply by temporary loading, or together with vertical drainage or with deep stabilization prior to construction is required.

Consolidation and stabilization of subsoils prior to construction is recommended to be performed in all such cases, where the weak, water-saturated subsoil does not have the necessary strength in its natural condition, and where the foundations of special constructions have proved ineffective.

Consolidation and stabilization of subsoil prior to construction is recommended to be performed for such structures, which have large support area, e.g. reservoirs, elevators, etc. and for structures founded on continuous foundation slab.

Consolidation and stabilization of subsoil by temporary loading only or together with vertical drainage or deep stabilization is recommended to be performed, when the depth of the weak soil deposit is exceeding 3.0 metres. The length of the drains or stabilized soil columns has to be determined from appropriate subsoil investigations.

The method to consolidate or stabilize weak water-saturated soils either by preloading alone, or together with vertical drainage or with deep stabilization can also be used, when the building site is to be prepared for reliable engineering communications, pavements and intrablock passages; and to reduce the detrimental effect of negative friction forces on pile foundations or other structures founded deeper in the soil deposit.

On Soviet territory these recommendations do not apply to the design and construction of hydraulic structures, dynamically loaded machine foundations, bases of technical structures, railways, roads and airfields.

1.2 Basic symbols and units

1.2.1 Physical properties of soils

ρ_s	kg/m ³	Density of solid particles. is Ratio between mass and volume of solid particles.
ρ_w	kg/m ³	Density of water.
ρ	kg/m ³	Density of soil. is Ratio between total mass and total volume of soil.
γ	kN/m ³	Unit weight of soil. is Ratio between total weight and total volume of soil.
ρ_d	kg/m ³	Density of dry soil. is Ratio between mass of solid particles and total volume of soil.
γ_d	kN/m ³	Unit weight of dry soil. is Ratio between weight of solid particles and volume of soil.

γ_{sat}	kN/m^3	Unit weight of saturated soil. is Ratio between total weight and total volume of completely saturated soil.
γ'	kN/m^3	Unit weight of submerged soil. is Difference between unit weight of soil and unit weight of water.
e	-	Void ratio. is Ratio between volume of voids and volume of solid particles.
w	-, %	Water content. is Ratio between weight of pore water and weight of solid particles (expressed in percentage).
S_r	-, %	Degree of saturation. is Ratio between volume of pore water and volume of voids.
k	m/s	Coefficient of permeability (or hydraulic conductivity). is Ratio between discharge velocity and corresponding hydraulic gradient (v/i).
1.2.2	Strength and deformability properties of soils	
τ_f	kPa	Shear stress at failure. is Stress acting tangentially to a given rupture plane.
c_u	kPa	Apparent cohesion intercept. In undrained situation, with saturated cohesive soils, c_u is also called undrained shear strength.

Φ_u	-	Apparent angle of internal friction.
u	kPa	Pore pressure. is Stress in the water in the voids of a fully saturated soil.
σ	kPa	Total normal stress. is Stress acting perpendicularly to a given plane.
σ'	kPa	Effective normal stress. is Normal stress transmitted by intergranular contacts ($\sigma' = \sigma - u$ for saturated soils).
ε	-, %	Linear strain. Change in length per unit length in a given direction.
μ	-	Poisson's ratio. is Ratio between linear strain changes perpendicular to and in the direction of a given uniaxial stress change.
E	kPa	Modulus of linear deformation. is Ratio between a given normal stress change and the linear strain change in the same direction.
E_{oed}	kPa	Oedometric modulus. is Ratio between change of effective normal stress and the corresponding change of volume per unit volume.
c_v	m ² /s	Coefficient of consolidation, defined by the equation $c_v = k \cdot E_{oed} / \gamma_w$, for one-dimensional vertical consolidation.

c_h	m^2/s	Coefficient of consolidation in two-dimensional consolidation by the use of drain wells.
H	m	Drainage path length. is Thickness of layer drained on one side only, or half thickness of layer drained on both sides.
T_v	-	Time factor. is Defined as $T_v = t \cdot c_v / H^2$.
t	s	Time elapsed since application of a change in total normal stress.
U	-, %	Degree of consolidation. is Ratio of mean effective stress increase at a given time to mean final effective stress increase.

2 SUBSOILS DEMANDING ADDITIONAL MEASURES TO IMPROVE THEIR PROPERTIES PRIOR TO CONSTRUCTION

The strengthening and preconsolidation of weak and compressible soils by preloading prior to construction shall be performed with soils that undergo large volume decreases and strength increases under sustained static loads, supposed there is sufficient time available for the required compressions to occur.

Surcharge loads, e.g. loads in excess of those to be applied by a permanent fill or structure can be used to accelerate the process.

When the anticipated time for compression is excessive, vertical drains or lime stabilized soil columns shall be used to shorten the time required for primary consolidation.

The soil types best suited for improvement by precompression are

- saturated soft clays,
- compressible silts,
- organic clays and
- peats.

Vertical drains are of greatest effectiveness in inorganic clays and silts that exhibit little secondary compression.

Deep soil stabilization by means of lime stabilized soil columns is of greatest effectiveness in silty clays with low plasticity index and low liquid limit and in clays deposited in fresh or brackish water with low organic content (less than 8 %).

3 PECULIARITIES OF SUBSOIL INVESTIGATIONS

3.1 Sampling

Specific characteristics of weak, water-saturated soils, as high water content, high plasticity, lamination of structure, and anisotropy of their properties, set the requirements for the application of special methods of soil sampling for laboratory investigations and also sophisticated methods for the determination of physical and mechanical properties of such soils.

Specially designed soil samplers have to be used to obtain undisturbed samples from weak, water-saturated soil. The sampler has to be fitted out with low-friction liners as soil containers and special closing devices, which prohibit sample disturbance during lifting up from the hole. Special care has to be taken on the sealing of the containers, and any dynamic effects during sampling and transportation to the laboratory have to be prohibited.

The number of samples required for further laboratory investigations has to be planned in accordance with the available Standards or Norms, but when those are not existing, the number of samples has to be planned by those who are responsible for the design of the subsoil improvement works.

In the case of subsoil improvement by vertical drainage two parallel samples from each planned sampling depth should be taken in order to be able to determine reliable consolidation coefficients in vertical and horizontal direction. The orientation of the samples in respect to bedding has to be marked during the sampling procedure without disturbance.

The mechanical and physical index properties of the weak, water-saturated subsoil should be determined as follows in Table 1.

Table 1. Subsoil properties needed for vertical drainage design.

Index property	Method of determination		Quality of samples	
	in situ	laboratory	undisturbed	disturbed
natural water content	-	+ o x	+ o x	+ o x
unit weight of soil		+ o x	+ o x	
density of solid particles		+ o x		+ o x
plasticity		+ o x		+ o x
void ratio		+ o x	+ o x	
consolidation coefficient	+ o x	+ o x	+ o x	
deformation modulus	+ o x	+ o x	+ o x	
undrained shear strength	+ o x	+ o x	+ o x	
shear parameters c, ϕ *)		+ o x	+ o x	
Note: +) for preloading, o) for vertical drainage, x) for deep stabilization				

*) to be determined only if necessary for stability calculations.

For exact determinations of the surface and the thickness of the weak, water-saturated soil stratum, static soundings or other suitable in situ testing methods should be used.

The variations of the strength properties of weak, water-saturated subsoils, which are considered to be improved, should be determined from the results of vane testing in situ.

3.2 Peculiarities of laboratory testing of weak water-saturated soils

The determination of strength characteristics of weak, water-saturated soils in laboratory is recommended to be carried out as unconsolidated-undrained tests (UU-tests).

Effective stresses should be used in the determination of shear parameters. The applied stresses should be increased from the in situ stresses up to a stress level exceeding the final stresses by 10...20 %, as compared to the action of a designed load or fill.

The stresses on the samples should be applied stepwise using steps of 0.02 kPa up to a stress level of 0.1 kPa and using steps of 0.05 kPa for the following loading steps.

Each step of applied stress should be kept constant until the primary consolidation of the soil sample has taken place. A strain change of less than 0.01 mm over an observation period of 12 hours can be considered as indication for the end of the primary consolidation.

Deformability characteristics of weak, water-saturated soils shall be determined from oedometer tests with undisturbed samples owing to natural water content and density. For compressibility tests the ratio of sample height to sample diameter should not be less than 1:4, and the sample shall have a minimum diameter of 50 mm.

The deformation modulus of weak, water-saturated soils should be determined from the interval of stresses, which conform to the actual stresses of the designed loads on the site.

The coefficients of consolidation for one-dimensional vertical and two-dimensional horizontal consolidation should be determined from the data of oedometer tests. The consolidation coefficients should be determined from loading steps corresponding to the designed loading procedure in situ.

4 MEASURES TO IMPROVE SUBSOILS PRIOR TO CONSTRUCTION

4.1 Consolidation of subsoil prior to construction by preloading

4.1.1 Types of preloads

Any system that leads to drainage of pore water and compression of the subsoil may be a suitable type of preload.

Earth fills, water in lined ponds and groundwater table lowering are recommended for preloading of larger areas.

Water in tanks, vacuum preloading by pumping from beneath an impervious membrane placed over the ground surface, or anchor and jack systems may be used for special cases.

Preloading by vacuum and water table lowering shall be used, if other types of preloads would cause stability problems.

4.2 Consolidation of subsoil prior to construction by preloading combined with vertical drainage

4.2.1 Field of application of vertical drainage

Vertical drains shall be used in all those cases, where the time required for surcharging is excessive, the surcharge required for the time available is too great, or the rate of strength gain is too slow to permit rapid fill placement. For soils whose compression is dominated by primary

consolidation, the rate of settlements will be speeded up by using vertical drains, because consolidation times vary as the square of the drainage path length, and because most deposits have greater permeability in the horizontal than in the vertical direction.

Vertical drainage is effective in all those weak and water-saturated soils, whose compression is dominated by primary consolidation.

Vertical drains are less effective in peats, organic clays, and other soils whose settlement behaviour is dominated by secondary compression.

4.2.2 Sand drains

Traditional sand drains are formed by infilling sand into a vertical hole in the ground. Vertical drains of sand, typically 150 to 600 mm in diameter and spaced anywhere from 1 to 6 metres on centres, may be installed either with displacement technique, using a closed mandrel to prepare the proper hole into the ground, or with non-displacement technique, generally by aid of a water jet.

Displacement drains are generally faster to install, but the surrounding soil may be disturbed and weakened, and a resulting "smear" zone can impede drainage.

Washing methods may result in irregularly shaped drains, thus their actual size, respectively effective radius is difficult to determine. Disposal of the wash-out material has to be planned carefully to avoid pollution of the surrounding area, nearby rivers, lakes or estuaries.

To avoid bulking of the sand during its placement in the drain, the formation of cavities and collapse on flooding, great care has to be taken to ensure that the sand is saturated at the time of placement.

4.2.3 Prefabricated drains

There are several types of flat band drains, which generally consist of a flat plastic core wrapped in a thin filter layer.

It is required, that the core is providing channels for the discharge of water, strength during installation and resistance to crushing from the soil pressures at depth.

As wrapping material treated paper and non-woven engineering filter fabrics, made of man made fibres (polypropylene, polyester, polyethylene) may be used. Such materials have proved to fulfill the filter function successfully and will ensure that fine particles are not able to press through and clog the drainage channels in the core. Although the permeability of the wrappings may vary from $k = 2 \cdot 10^{-4}$ to $6 \cdot 10^{-9}$ m/s, they are thin and provide little resistance to flow.

Band shaped drains are generally placed by displacement method using hollow mandrels of rectangular, rhomboidal or round cross-section. The rig must have sufficient power to insert and recover the mandrel. The entry resistance is greatly influenced by the size of the mandrel, the type of the disposable end shoe and the adhesion of the soil to be penetrated.

The approximate size 100 • 4 mm for band-shaped drains has originally been designed to require some 280 kN of static force for being placed into the ground.

4.3 Improvement of subsoil prior to construction by deep stabilization with lime stabilized soil columns

Lime stabilized soil columns are produced by feeding a metered quantity of stabilizer (= unslaked lime and possible additives) into a soft clay mass through a rotary drill

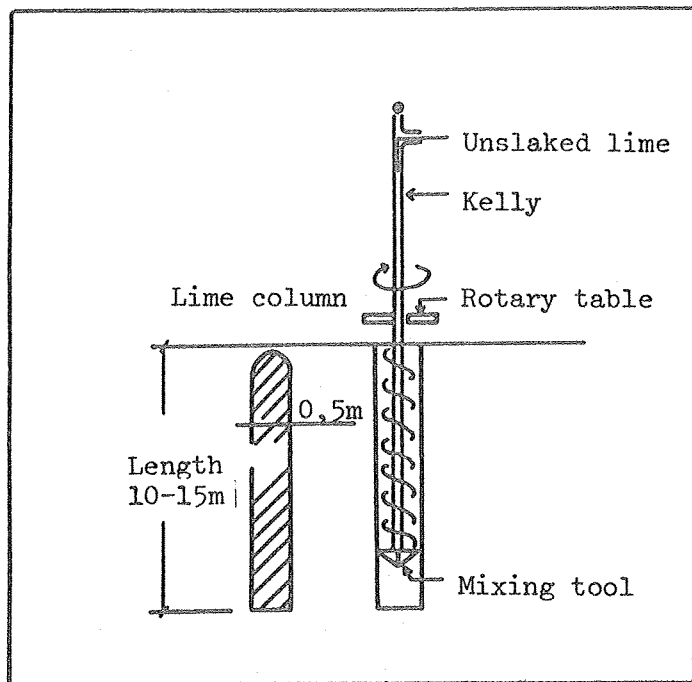


Fig. 1 a. Manufacture of lime columns.

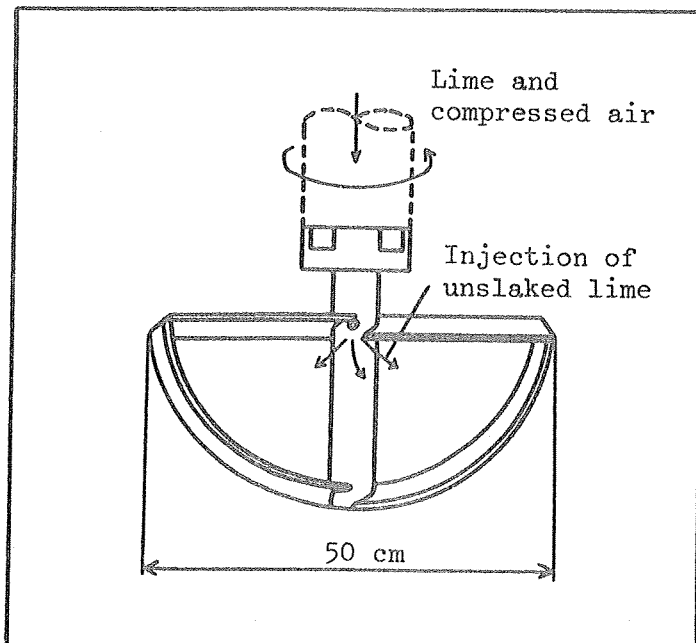


Fig 1 b. Mixing tool.
The pitch of the blades corresponds to a penetration of 100 mm/revolution.

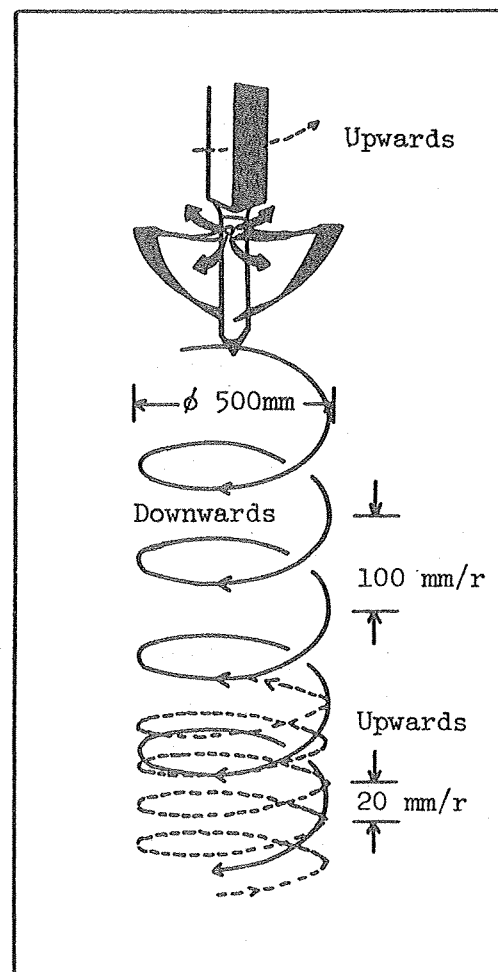


Fig. 1 c. The principle of the deep soil stabilization. Unslaked lime is blown into the ground while whirling upwards the whisk.

equipped with a special auger bit ("egg-beater" mixing tool) to both advance the desired depth and to mix the soil and admixture thoroughly during withdrawal.

Figure 1 is a schematic diagram of the process as used for construction of a lime stabilized soil column.

A lime-column diameter of 0,5 m is standard and columns up to 10 m length may be produced with the existing rigs.

In addition to lime special chemicals to increase the stabilizing effect may be used. When quicklime (CaO) is used as the stabilizer the heat of hydration can be substantial, and the drying of the surrounding ground due to the consumption of water can be significant. Admixture contents are usually in the order of 5 to 15 per cent (by dry soil weight).

The final strength after treatment will be many times greater than that of the untreated soil. Strength increases of 5 to 20 times the untreated value are typical.

The rate of hardening will be influenced by ground temperature. If the chemical reactions take place at ground temperatures below $+4^{\circ}\text{C}$ the resulting rate of strength increase will be extremely slow.

The lime stabilized soil columns have generally a 100 to 1000 times higher permeability than the soil in the untreated state. As a consequence the column can act as vertical drains, thus speeding-up settlements.

Predrilling may be required during the winter when the ground is frozen or when a surface rockfill has to be penetrated.

5 PECULIARITIES OF CALCULATING TOTAL SETTLEMENTS AND
RATE OF SETTLEMENT FOR SUBSOIL IMPROVEMENT WITH
VERTICAL DRAINAGE

In determining the settlement it is advisable to take as a calculation diagram the condition of vertical compression of weak soil while compacting it by fill.

The definition of final settlement values and their development with time should be made for individual sites of the territory under compaction. The number of these sites and their arrangement on the plan is ascertained as function of the degree of geological bedding homogeneity and deformability characteristics of the soils being under compaction.

Vertical drains made of artificial or natural materials are taken as perfectly ready, that is they fully penetrate the compacting weak soil.

In the cases when the weak soil is located between two draining layers and the drain cuts through the weak soil fully, it is assumed that the compaction of this layer takes place due to the water pressing out from the soil pores into the drain and to both seepaging layers as well. This combined process is considered the superimposition of two seepage flows, a vertical one, corresponding to the one-dimensional problem of consolidation, and a horizontal one, corresponding to the plane axisymmetric problem of the theory of consolidation.

Since in practice the drains are arranged in plane in a triangular or square pattern, the effective zone of the drains is apparently complex. The circular (ring) form of drain effect is taken to make the calculations simple. The diameter of this form is defined from the formulae:

with drains arranged in square pattern

$$d_e = 1,13 d \quad (1)$$

$$d_e = 1,05 d \quad (2)$$

where d is distance between drain axes.

In this case the surface of the cylinder with diameter d_e is impermeable, and the drain's material is perfectly permeable.

The settlement of weak soil layer at instant of time is defined from the formula:

$$S_t = U_v \cdot S_{\infty} \quad (3)$$

Where S_{∞} is final settlement of weak soil layer in stabilized state, being stated for the case of comparison without possible lateral expansion, based on the results of consolidation tests in oedometer.

U_v = degree of consolidation

The degree of consolidation is recommended to be defined (to calculate) from the formula:

$$U_v = 1 - \frac{\bar{u} z}{\alpha \cdot t} \quad (4)$$

where $\frac{\bar{u} z}{\alpha \cdot t}$ is relative average excessive pressure, being stated from Table 2 depending on the time factors T_v and \bar{T}_v .

Table 2. Relative average excessive pressure depending on the time factors.

T_v	Relative average excessive pressure $\frac{\bar{u}z}{\alpha} \bar{t}$ for the peaty layer with two sided drainage and with $T_v =$		
	0,1	0,2	0,3
0,00	1,00	1,00	1,00
0,05	0,83	0,83	0,83
0,10	0,76	0,76	0,76
0,20	0,56	0,66	0,66
0,30	0,44	0,50	0,59
0,40	0,34	0,39	0,45
0,50	0,27	0,31	0,35
0,60	0,21	0,24	0,27
0,70	0,16	0,19	0,21
0,80	0,13	0,14	0,17
0,90	0,10	0,12	0,13
1,00	0,08	0,09	0,10
1,10	0,06	0,07	0,08
1,20	0,05	0,05	0,06
1,30	0,04	0,04	0,05
1,40	0,03	0,03	0,04
1,50	0,03	0,02	0,03
1,60	0,02	0,02	0,02
1,70	0,01	0,02	0,02
1,80	0,01	0,01	0,01
1,90	0,01	0,01	0,01
2,00	0,01	0,01	0,01

Note: for the intermediate meanings of T_v and \bar{T}_v the value is defined from interpolation.

Time factors T_v and \bar{T}_v are recommended to be calculated from the formula:

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t \quad (5)$$

and

$$\bar{T}_v = \frac{c_v}{H^2} \bar{t} \quad (6)$$

where

- c_v is coefficient of consolidation with seepage of water in vertical direction, m^2/year .
- H is length of seepage, m , which is taken:
is half width of weak soil layer to be consolidated, with two-sided drainage,
is width of weak soil layer to be consolidated, with one-sided drainage,
- t is designed time of consolidation, year,
- \bar{t} is time, necessary to build up the constant load on the weak soil layer, year.

The time necessary for the consolidation of the weak watersaturated soil layer up to the designed degree of consolidation with constant load is calculated in accordance with the formula (5).

When applying vertical drains, completely penetrating the weak soil layers and having drainage layers at both ends of the drains, it is recommended to define the degree of consolidation from the formula (7) taking into account the seepage of water in horizontal and vertical directions:

$$U_{vh} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \quad (7)$$

where

- U_{vh} is degree of consolidation with regard to vertical and horizontal flow of porewater,
- U_v is degree of consolidation when seepage of porewater takes place in vertical direction, and this degree of consolidation is defined in accordance with equation 4 of these recommendations.

U_h is degree of consolidation, when seepage of porous water takes place in horizontal direction, and this degree of consolidation is defined in accordance with equation 8 of these recommendations.

In the case of practically instant application of the load the degree of consolidation, which is achieved only due to the application of vertical drains, is defined from formula 8 on the assumption that horizontal drainage layers at the ends of the drains are absent:

$$U_h = 1 - \exp \frac{-8 T_h}{F(\beta)}, \quad (8)$$

where

T_h is time factor with seepage only in horizontal direction, defined in accordance with equation 9 of these recommendations,
 $F(\beta)$ is value, depending on the relationship between the diameter of the drain's effective zone and the diameter of the drain; this value is defined in accordance with equation 10 of these recommendations.

The time factor with porewater seepage only in horizontal direction is defined from the formula:

$$T_h = \frac{c_h}{(d_e)^2} t, \quad (9)$$

where

c_h is coefficient of consolidation with pore water seepage in horizontal direction, m^2/year ,

t is time from the moment of load application, year,
 d_e is diameter of the drain's effective zone, m,

$F(\beta)$ is defined from the formula:

$$F(\beta) = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \ln \beta - \frac{3\beta^2 - 1}{4\beta^2}, \quad (10)$$

where

$\beta = \frac{d_e}{d_o}$ is relationship between the diameter of effective zone and the drain's diameter.

With application of prefabricated drains the value d_o is taken to be equal to 0,05...0,06 m (corresponding to its circumference).

Degrees of consolidation U_h depending on the time factor can be defined from Table 3 with various β -values.

Table 3. Relationship between degree of consolidation (U_h) and time factor T_h in the case of instant loading of base with vertical drains.

U_h	T_h					
	$\beta=3$	$\beta=5$	$\beta=10$	$\beta=15$	$\beta=20$	$\beta=25$
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,007	0,012	0,021	0,026	0,030	0,033
0,2	0,014	0,026	0,040	0,055	0,063	0,069
0,3	0,023	0,042	0,070	0,088	0,101	0,170
0,4	0,033	0,060	0,101	0,126	0,144	0,158
0,5	0,045	0,081	0,137	0,171	0,195	0,214
0,6	0,059	0,107	0,181	0,226	0,258	0,283
0,7	0,077	0,141	0,238	0,297	0,339	0,372
0,8	0,103	0,188	0,318	0,397	0,454	0,498
0,9	0,148	0,270	0,454	0,567	0,649	0,172
0,95	0,192	0,351	0,591	0,798	0,844	0,927
0,99	0,296	0,539	0,909	1,135	0,298	1,424

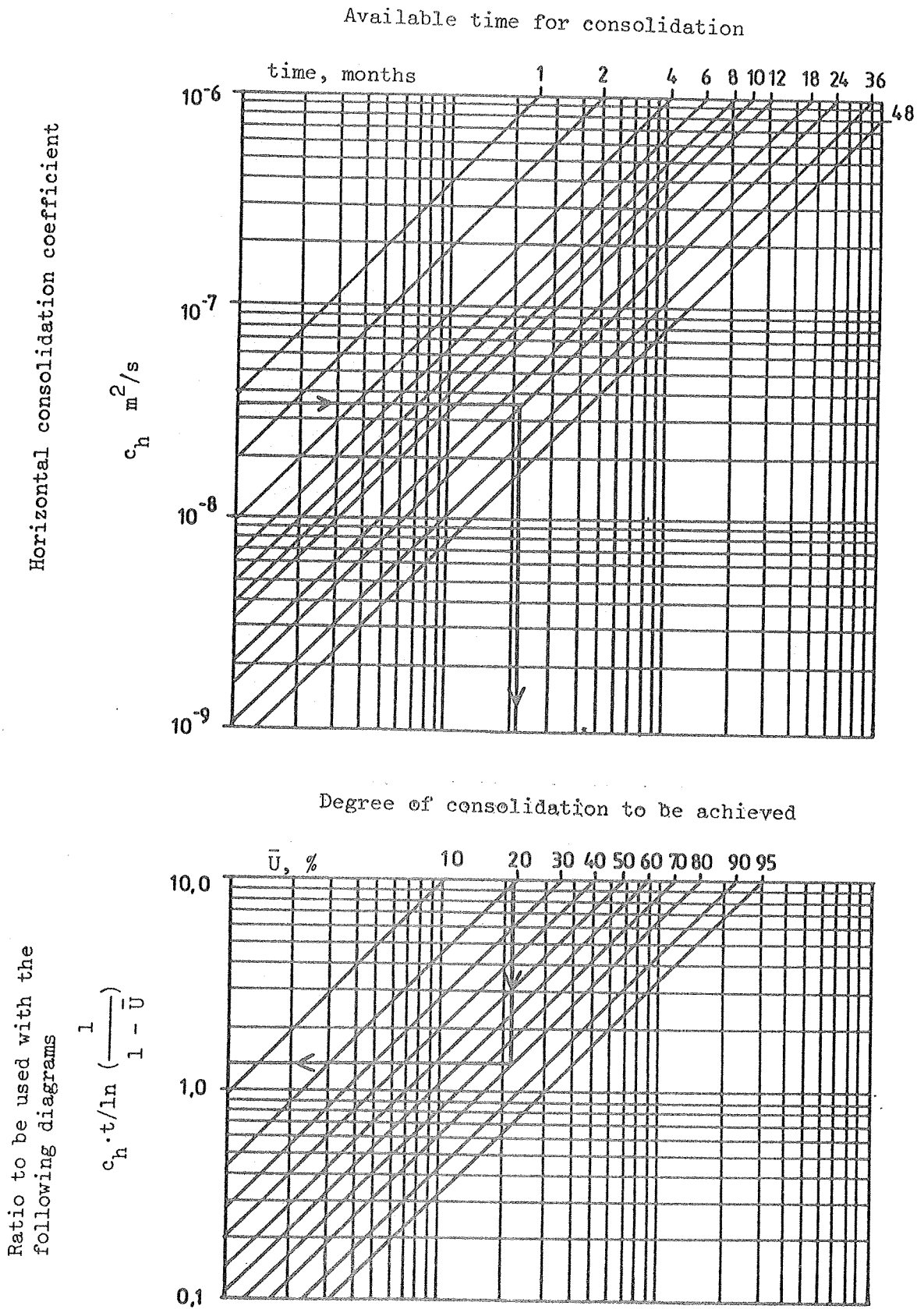
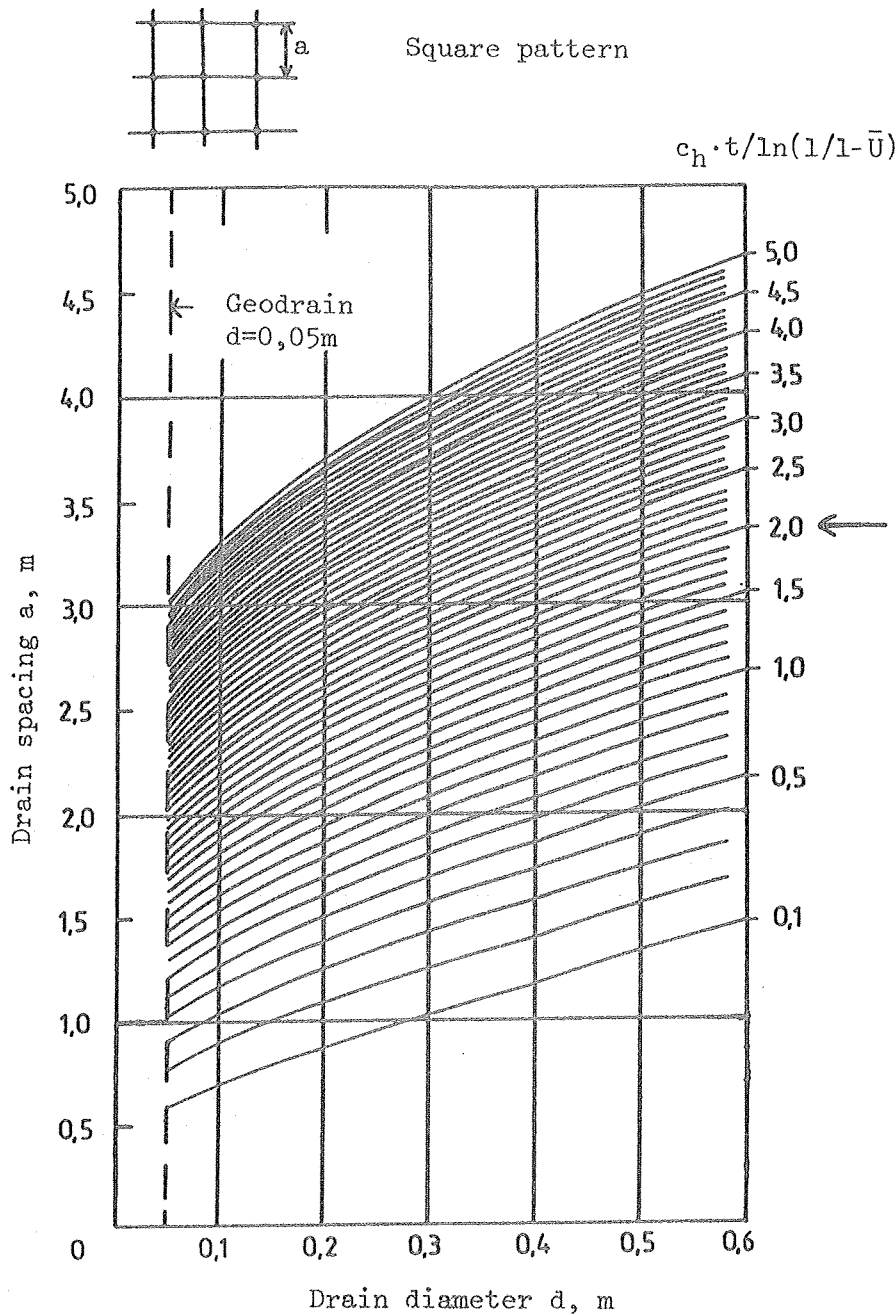


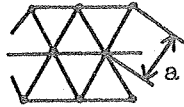
Figure 2.

For a quick determination of the necessary drain spacing with vertical drainage the following diagrams may be used. (Cont. next pages)

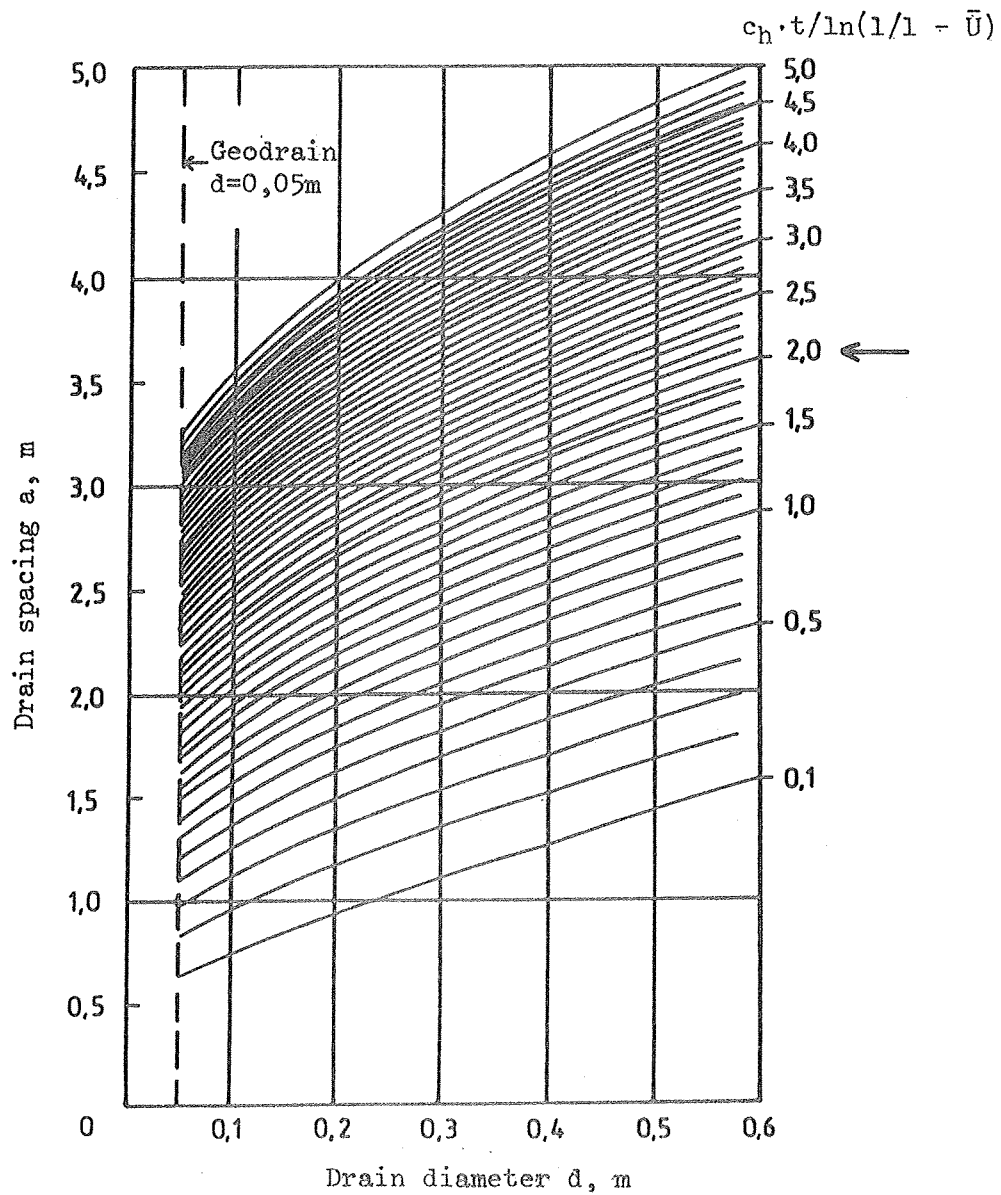


Example:
(Fig. 2)

Horizontal consolidation coefficient $c_h = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Available time for consolidation 24 months. Degree of consolidation to be achieved $\bar{U} = 80\%$ $\Rightarrow c_h \cdot t / \ln\left(\frac{1}{1-\bar{U}}\right) = 2,0$. Drain diameter $d = 0,1 \text{ m}$. Result: Drain spacing: $a = 2,25 \text{ m}$ in case of square pattern.



Triangular pattern



Example:
(Fig. 2)

Horizontal consolidation coefficient $c_h = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Available time for consolidation 24 months. Degree of consolidation to be achieved $\bar{U} = 80\%$ $\Rightarrow c_h \cdot t / \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{U}} \right) = 2,0$. Drain diameter $d = 0,1 \text{ m}$. Result: Drain spacing: $a = 2,4 \text{ m}$ in case of triangular pattern.

5.1 Calculation of settlements and time of consolidation when deep stabilization with lime columns is used

5.1.1 Total settlements

The calculation of the total settlements of a lime column group should be made as illustrated in Figure 3.

It is assumed in the calculations that the maximum total settlement corresponds to the sum of the local settlements of the reinforced block, Δh_1 , and of the soil under the block, Δh_2 .

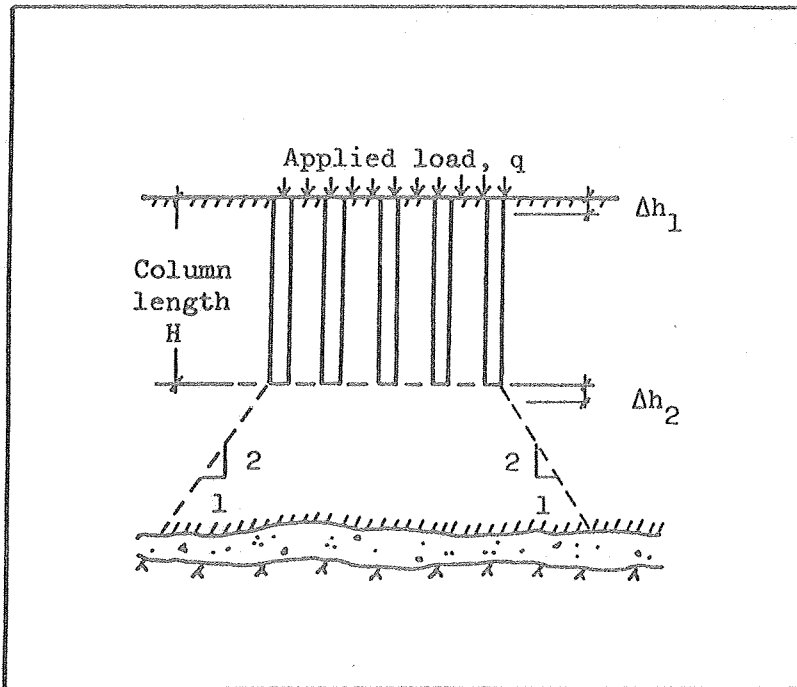


Figure 3. Calculation of total settlements.

5.1.2 Case A

The applied load and the local settlements of the reinforced block will be so large that the yield strength Q_{yield} of the column is exceeded.

For this case the applied load q is divided in two parts, q_1 and q_2 , where q_1 is carried by the lime columns and q_2 by the

soil between the columns.

Load q_1 depends on the yield strength of the columns $q_1 = n \cdot Q_{\text{yield}}/B \cdot L$ where n is the total number of columns and B and L the width and length of the loaded area. The yield limit of the columns corresponds to about 70 % of the ultimate strength as evaluated by short-term load tests. The yield strength and the bearing capacity of the columns will gradually increase with time (Figure 4).

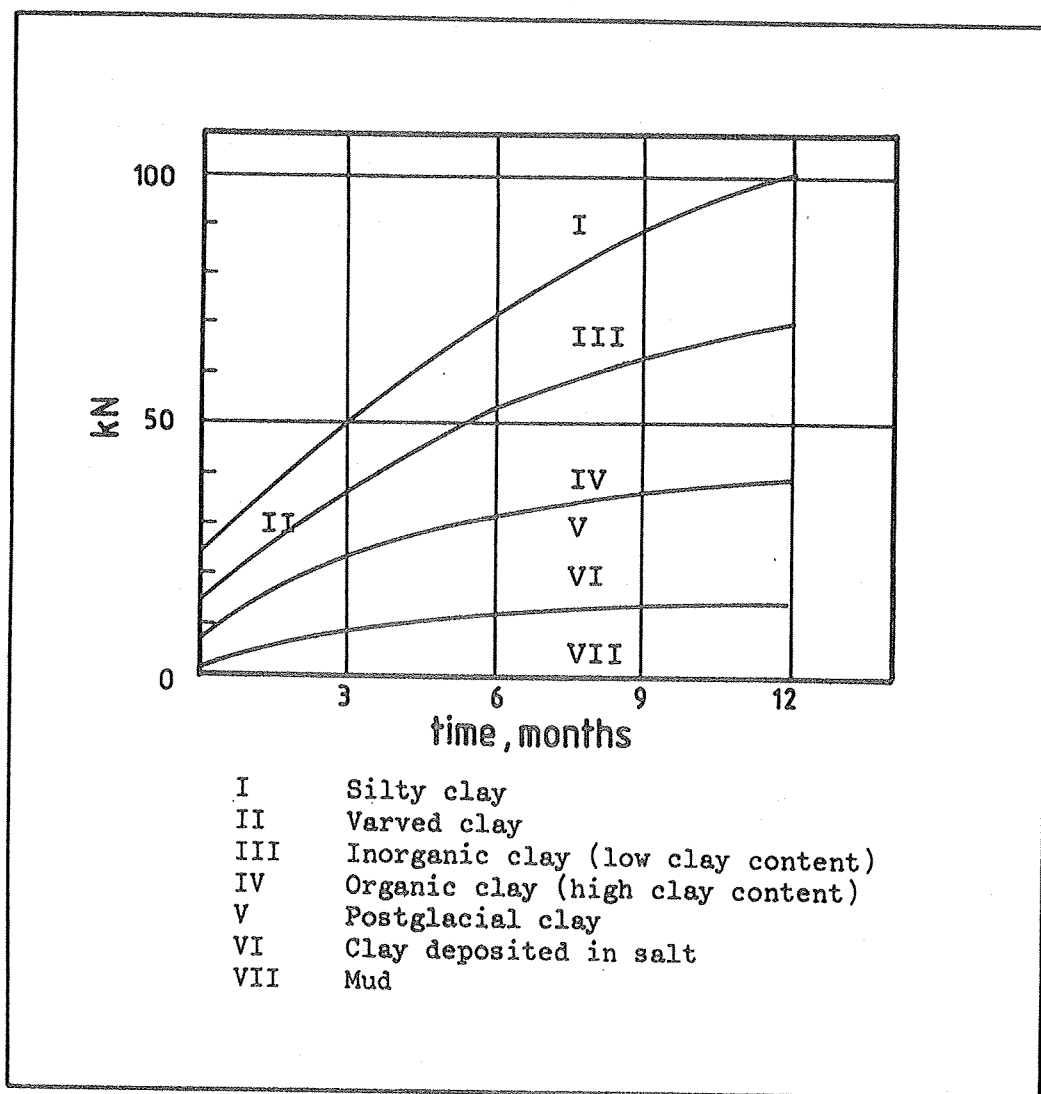


Figure 4. Estimate of the yield strength for lime stabilized columns.

The local settlement of the block (Δh_1) will then be governed by the load q_2 ($q_2 = q - q_1$) which is carried by the

untreated soil between the columns. This settlement can be calculated by standard methods using results from oedometer tests.

It is suggested to calculate the resulting strength increase from the 2:1 method as illustrated in Figure 5. The untreated soil within the block is divided into layers and the compression of each layer is evaluated separately.

The local settlement of the soil below the block is calculated for the stress increase caused by load q_1 which is transferred to the bottom of the reinforced block and by the load increase q_2 transferred through the untreated soil between the columns. The calculations have to be done separately for the two loads since they act at two different levels in the soil. It is suggested that the 2:1 method also can be used for this case.

The local settlement below the block can then be calculated by dividing the soil in layers. The compression of each layer is calculated for the stress increase caused by q_1 and q_2 .

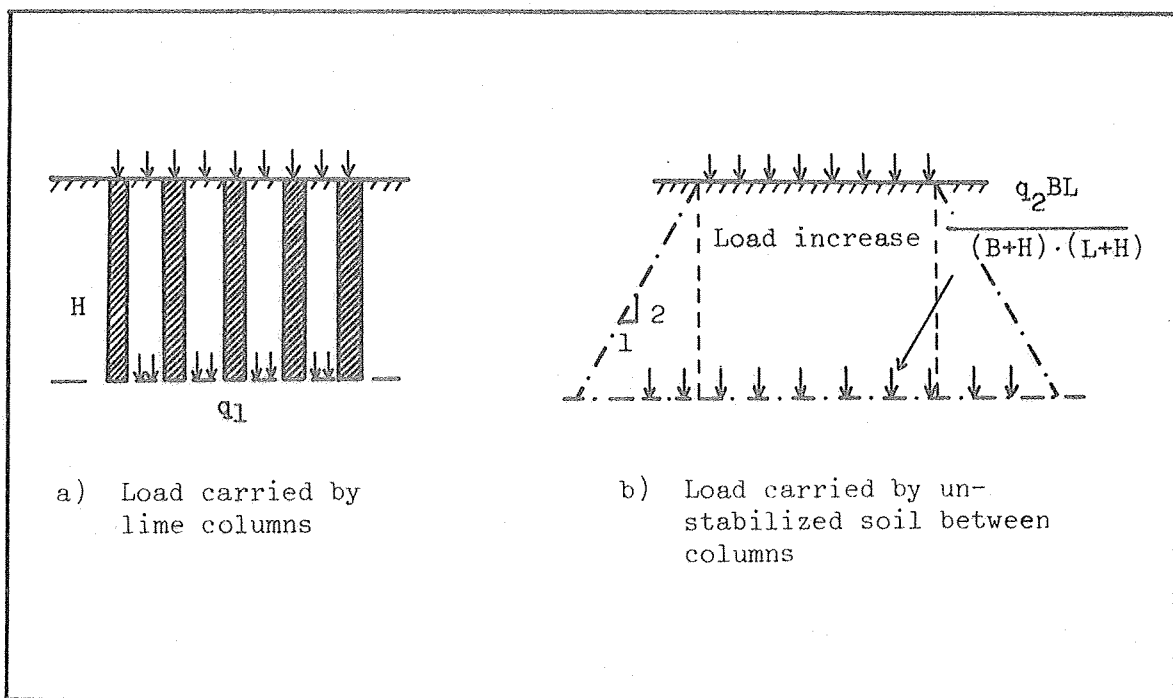


Figure 5. Load distribution for the calculation of settlements in case A, when the yield strength of the columns is exceeded.

5.1.3 Case B

The deformation of the block is so small that the yield strength of the columns is not exceeded. The relative stiffness of the columns with respect to the surrounding untreated soil between the columns will in this case govern the settlement of the block. The relative deformation of the columns and of the soil between the columns will be the same in this case.

It is therefore recommended that the stress increase in the block is calculated for the total applied load q from the 2:1 method.

The average compression modulus M_{av} ($d\sigma/d\varepsilon$) of the composite material in the block depends on the relative modulus of elasticity of the column material (E_{col}) with respect to the compression modulus of the untreated clay between the columns (M_{soil}). This average compression modulus can be calculated from

$$M_{av} = (1 - a) M_{soil} + a \cdot E_{col}, \quad (11)$$

where

$a = n \cdot A_{col} / B \cdot L$ is the relative area of the columns
 n the total number of columns
 A_{col} the area of the columns
 B and L the width and the length of the loaded area.

The equivalent modulus of elasticity of the column material taking into account the effect of time can be evaluated from the relationship

$$E_{col} = 250 \cdot c_{u,col}, \quad (12)$$

where

$c_{u,col}$ is the undrained shear strength of the column material.

The compression modulus of the untreated clay between the columns is affected by preloading due to, for example, dessication or a temporary lowering of the ground-water level.

When the preconsolidation load will not be exceeded the compression modulus can be estimated from the relationship

$$M_{\text{soil}} = 250 \cdot c_u, \quad (13)$$

where

c_u is the undrained shear strength of the untreated clay.

In the case where the clay is normally consolidated or the preconsolidation pressure will be exceeded, the compression modulus of the soil has to be evaluated from oedometer tests.

The local settlement of the soil below the reinforced block is calculated for a load q at the ground surface by dividing the soil below the block into layers and calculating the compression of each layer separately.

5.1.4 Settlement rate

As the lime columns act as vertical drains in the soil, the methods developed by Barron (1948) for sand drains can be used to calculate the settlement rate for lime columns. The permeability of soft cohesive soils is increased 100 to 1000 times when the soil is mixed with unslaked lime. This increase is sufficient to make the material pervious with respect to the surrounding untreated soil.

In the case when the lime columns do not penetrate the weak, water saturated subsoil totally, the stabilized soil columns

will function as drains down to their penetration depth and also as a drainage layer located at the bottom of the columns for the underlying strata.

The effect of preloading on the settlement rate can be determined according to the principles given in Figure 6.

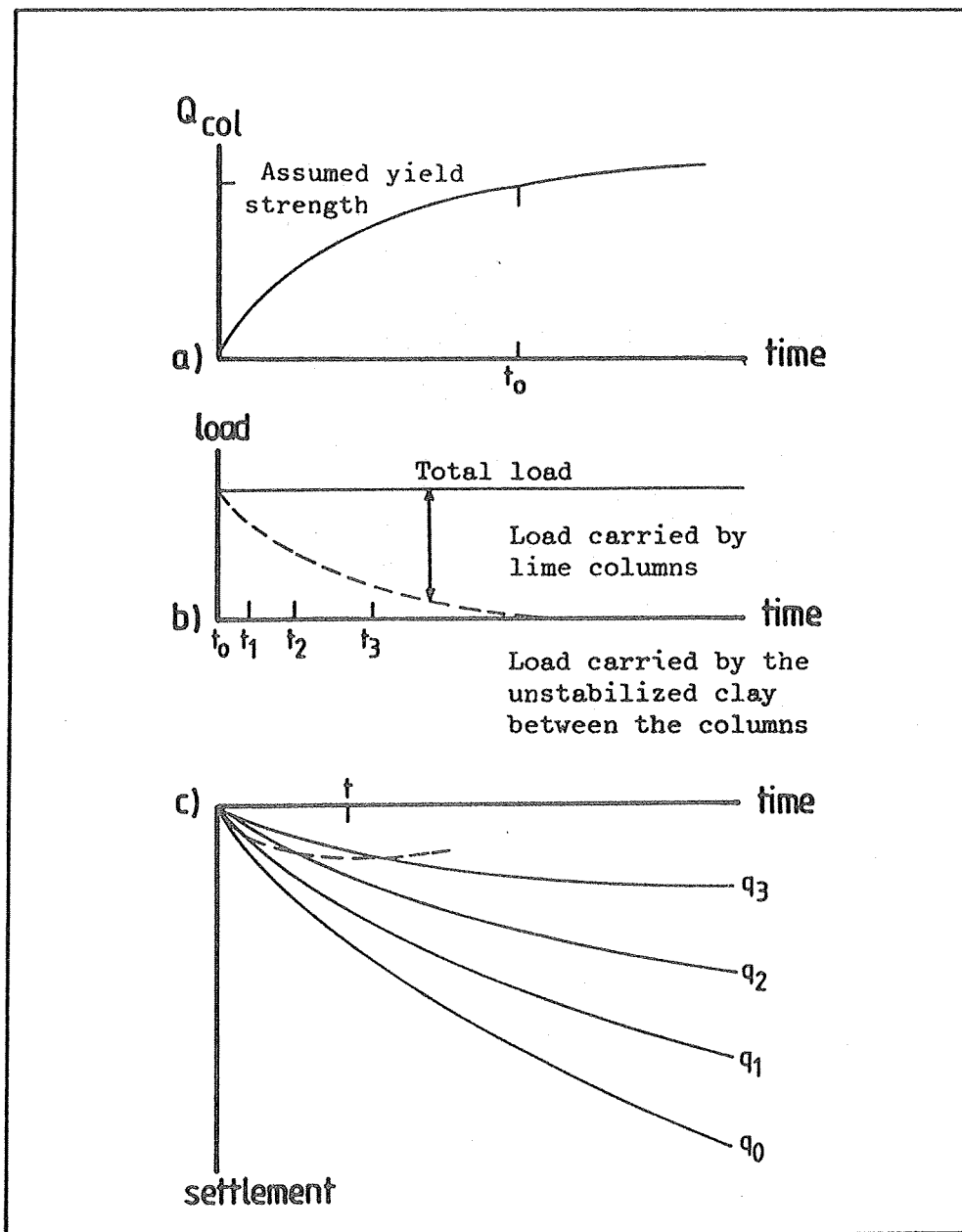


Figure 6. Effect of preloading on the settlement rate.

5.2 Material requirements

5.2.1 Sand for sand drains

To ensure good permeability, the grading of the sand should conform to the suggested gradation zone presented in Figure 7.

The fraction by weight finer than 60 μm should not exceed 2 %. The sand should be free from all organic matter, salt and cementitious materials.

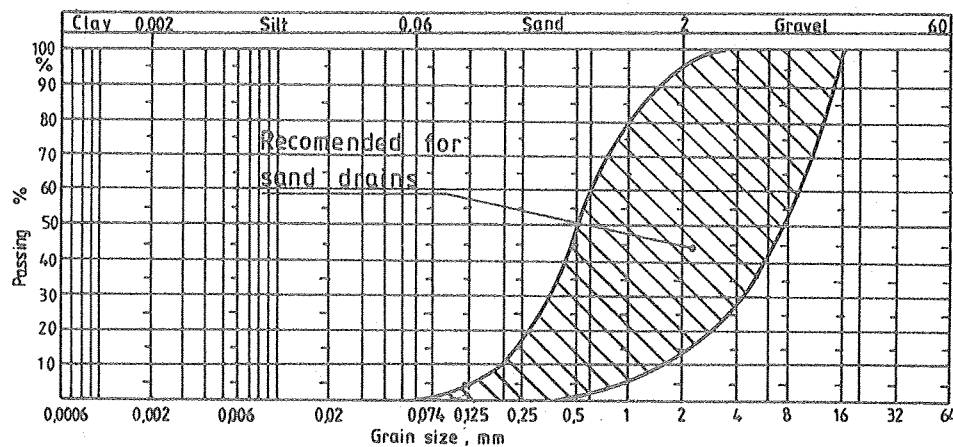


Figure 7. Recommended material for sand drains.

5.2.2 Prefabricated drains

Plastic cores should be made from materials which will not disintegrate or become brittle during the serviceable life of the drain and which will be tough and flexible enough to withstand the stresses and strains imposed by the installation technique. When wrapped by the filter material their form should provide sufficient hydraulic conductivity.

The treated paper and engineering fabric filters should ideally have a high permeability and high filtration capacity. The paper and non-woven fabrics that are used are

thin and their resistance to flow is normally very small; it is their filtration properties that are important.

The commonly used non-woven fabrics are nearly all manufactured from polymers which are affected by ultraviolet light. The storage of these materials protected from direct sunlight is therefore essential.

6 ARRANGEMENT OF WORKS FOR CONSOLIDATION OR STABILIZATION OF WEAK WATER-SATURATED SUBSOILS BY VERTICAL DRAINAGE AND DEEP STABILIZATION

6.1 Vertical drainage works

The following works have to be performed in advance of the installation of the vertical drains:

- all services and clear obstructions such as rubble, concrete, asphalt and timber have to be diverted from the site of the drainage work
- a working platform, on which the special drainage equipment will operate, preferably by filling and planing of a sand layer or other suitable drainage material, 0,4 to 0,5 m thick, has to be provided
- marking out of points arrangement of vertical drains on the planed drainage layer
- preparative works, including power delivery, transportation of natural and man-made materials for drains
- arrangement of works providing water collection on the soil surface in the process of consolidation and its removal from the site when the improvement works are carried out.

For sand drain installations a mandrel having a cap for connection of a receiving bunker and an opening lower part

is used. The diameter of the casing pipe is recommended to be not less than 0,3 m. The casing pipe has to be equipped with a device to connect a vibrator.

In the installation of sand drains the following works are carried out

- sinking of the mandrel into the subsoil to the designed depth
- filling of inserted mandrel with sand or other proper natural drainage material and adding of water, if necessary, to avoid bridging of the drainage material during the lifting up stage of the mandrel
- if required, vibrating of the mandrel and simultaneous extraction from the subsoil.

If solid inclusions, present in the subsoil, prevent the mandrel at any point from being stitched down to the designed depth, the mandrel has to be lifted up and the resulting hole has to be filled with drainage material. Then an additional drain has to be installed alongside.

In the case a vibrator is used for installation and lifting up of the mandrel, the extraction of the mandrel from the soil has to be performed with a constant speed of approximately 10 m/min. The vibrator has to be switched off at the moment the lower end of the mandrel has reached a level 0,5 m below ground surface.

In the case of sand drains the excessive drainage material, which is left on the surface after extraction of the mandrel, must not exceed 5 % of the drain's volume.

Layer-by-layer filling of the surcharge is performed after the installation of the drains has been completed. The thickness of single fill layers should not exceed 1,5 m.

While consolidating and stabilizing weak water-saturated soils on large-size construction sites, the loading surcharge is recommended to be filled simultaneously at separate

adjacent sites in order to employ most effectively the equipment in use.

Variations of settlements due to subsoil improvement works at different sites should be eliminated by changing the height of the loading surcharge.

6.2 Deep stabilization by the lime column method

The following works have to be performed in advance on the site:

- all services and clear observations such as rubble, concrete, asphalt and timber have to be diverted from the site
- a working platform, on which the special equipment for deep stabilization will operate, preferably by filling and planing of a sand layer or other suitable drainage material, 0,4 to 0,5 m thick, has to be provided
- marking out of points arrangement for the stabilized soil columns on the planed drainage layer
- preparative works, including power delivery, transportation of stabilizing agent and compressed air supply to the site
- arrangement of works, providing continuous supply of stabilizing agent to the progress of works.

The following works have to be carried out for the production of lime stabilized columns:

- screwing down of the auger into the soil to a depth that corresponds to the prescribed column length
- powdered unslaked lime and possible additives are forced into the soil with compressed air through a hole located just above the horizontal blade of the auger while the auger is rotated in reverse direction and simultaneously lifted up
- in order to ensure thoroughly mixing of the stabilizing agent with the soil, the withdrawal rate of the tool has

to be adjusted to about one-fifth of that when the auger is drilled down into the soil

- the feeding of the stabilizing agent has to be stopped at the moment the auger has reached a level 0,5 m below the ground surface.

If solid inclusions, present in the subsoil, prevent the auger at any point from being drilled down to the designed depth; the auger has to be withdrawn by simultaneous stabilizing of the short-measured column and an additional column has to be stabilized alongside.

6.3 Production of works for the installation of vertical drains in water

Improvement of subsoils by vertical drainage is recommended to be performed at outside temperatures not lower than -15°C .

At the production of works in winter uninterrupted power and steam supply should be provided. Reliable water derivation from the construction sites should be arranged.

Drainage material has to be protected against freezing.

If the thickness of the frozen surface layer is exceeding 0,2 metres, the mandrel should be driven down through leading holes or through prethawed soil. Leading holes are recommended to be predrilled or punched. Thawing of soil can be performed by electro or steam-heating.

The cross-section of the leading holes or the zone of thawed soil should not be less than the outer diameter of the mandrel. The leading holes or the prethawed zones have to penetrate the frozen layer totally.

The mandrel should be equipped with a heating device to avoid soil freezing. Drainage material for sand drains should not contain ice crumbs.

After the drain installation it is recommended to cover the surface of the soil with a heat-insulating layer.

The drained sites should be divided into zones of 25 • 25 m size and trenches cut at the boundaries of the zones through the whole depth of the frozen soil layer in order to ensure continuity of the consolidation process.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
Лаборатория Геотехники

ГОССТРОЙ СССР/НИИОСП

Научно-исследовательский институт оснований и подземных
сооружений

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЦИОНАЛЬНЫМ МЕТОДАМ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ
ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН ДЛЯ
УСТРОЙСТВА ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ

Комиссия по научно-техническому сотрудничеству.

Группа специалистов по строительству.

Тема 1.2 Устройство фундаментов в сложных геологических
условиях.

Москва, 1984

Еспоо, 1984

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
РЕЗЮМЕ	7
СОДЕРЖАНИЕ	48
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	50
1.1 Область распространения рекомендаций.....	50
1.2 Основные термины и принятые условные обозначения.....	51
1.2.1 Физические свойства грунта.....	51
1.2.2 Прочностные и деформационные свойства грунта.....	52
2 ПОДСТИЛАЮЩИЕ СЛОИ, ТРЕБУЮЩИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ИХ СВОЙСТВ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ.....	54
3 ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ.	
3.1 Отбор образцов.....	55
3.2 Особенности лабораторных исследований свойств слабых водонасыщенных грунтов.....	57
4 МЕТОДЫ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СТРОИТЕЛЬСТВА.....	58
4.1 Уплотнение с помощью временной нагрузки до начала строительства.....	58
4.1.1 Виды предварительных нагрузок.....	58
4.2 Консолидация слабых водонасыщенных грунтов путем предварительного нагружения с использованием вертикального дренирования.....	59
4.2.1 Область применения вертикального дренажа.....	59
4.2.2 Песчаные дрены.....	59
4.2.3 Дрены заводского изготовления.....	60

4.3 Уплотнение глубинной стабилизацией с помощью известковых колонн.....	62
5 ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ОСАДОК И СРОКОВ КОНСОЛИДАЦИИ ПРИ УПЛОТНЕНИИ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН.....	63
5.1 Расчет осадки и скоров консолидации при применении глубинного уплотнения с помощью известковых колонн.....	68
5.1.1 Общие осадки.....	68
5.1.2 Случай А.....	72
5.1.3 Случай В.....	75
5.1.4 Скорость осадки.....	76
5.2 Требования к материалу.....	78
5.2.1 Песок для песчаных дрен.....	78
5.2.2 Дрены заводского изготовления.....	78
6 ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УПЛОТНЕНИЮ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН.....	79
6.1 Устройство вертикальных дрен.....	79
6.2 Глубинное уплотнение методом известковых колонн.....	81
6.3 Производство работ по устройству вертикальных дрен в зимнее время.....	82

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Область распространения рекомендаций

Настоящие рекомендации определяют методы уплотнения слабых водонасыщенных грунтов на которых фундаменты не могут быть возведены без предварительного повышения прочностных и деформационных свойств этих грунтов.

Рекомендации составлены в развитие советских строительных норм, регламентирующих принципы проектирования оснований и фундаментов.

Требования настоящих Рекомендаций должны соблюдаться при проектировании и производстве работ по предпостроечному уплотнению временной нагрузкой оснований, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами, в том числе с использованием вертикального дренирования и глубинной стабилизации известковыми колоннами.

Предпостроечное уплотнение оснований рекомендуется проводить в тех случаях, когда в условиях естественного залегания слабые водонасыщенные грунты не обладают необходимой прочностью, а применение специальных конструкций фундаментов оказывается малоеффективным в технико-экономическом отношении.

Предпостроечное уплотнение оснований рекомендуется проводить под сооружения, имеющие развитую площадь опирания на грунт-резервуаров, элеваторов и.т.п., а также сооружений, возводимых на сплошной фундаментной плите.

Уплотнение оснований временной нагрузкой с применением вертикальных дрен или известковых колонн рекомендуется проводить в случаях, когда толщина слоев слабых грунтов превышает 3, 0 м. Длина дрен или известковых колонн в этом случае устанавливается на основе данных инженерно- геологических изысканий.

Уплотнение слабых водонасыщенных грунтов с использованием вертикальных дрен может быть также использовано при инженерной подготовке территории строительства с целью обеспечения надежной эксплуатации инженерных коммуникаций, дорожных покрытий и внутриквартальных проеедов, а также для уменьшения воздействия сил отрицательного трения на свайные фундаменты и другие заглубленные в грунт сооружения..

На территории СССР положение настоящих Рекомендаций на случаи распространяется на проектирования и устройства оснований гидротехнических сооружений, железных и автомобильных дорог, аэродромных покрытий и фундаментов под машины и оборудование с динамическими нагрузками.

1.2 Основные термины и принятые условные обозначения

1.2.1 Физические свойства грунта

γ	кН/м ³	объемный вес грунта, определяемый как отношение общего веса грунта к его объему;
ρ_s	кг/м ³	плотность минеральных частиц грунта, определяемая как отношение между массой и объемом частиц грунта;
ρ	кг/м ³	плотность грунта, определяемая как отношение между общей массой и объемом грунта;
ρ_w	кг/м ³	плотность воды;
ρ_d	кг/м ³	плотность скелета грунта, т.е. отношение массы частиц грунта к объему грунта;

γ_{sat}	кН/м ³	объемный вес полностью водонасыщенного грунта, т.е. отношение общего веса к общему объему полностью водонасыщенного грунта;
γ'	кН/м ³	объемный вес взвешенного в воде грунта т.е. разность между объемным весом грунта и объемным весом воды;
e		Коэффициент пористости, определяемый как отношение объема пор к объему частиц грунта;
w		влажность грунта в природном состоянии, определяемая как отношение между весом воды в порах грунта и весом частиц грунта;
S_r		степень водонасыщения, определяемая как отношение между объемом воды в порах и объемом пор грунта;
k	м/сек.	коэффициент фильтрации, отношение между скоростью фильтрации и соответствующим гидравлическим градиентом.
γ_d	кН/м ³	объемный вес скелета грунта, т.е. отношение веса частиц грунта к обему грунта

1.2.2 Прочностные и деформационные свойства грунта

τ_f	кПа	предельное сопротивление сдвигу;
c_u	кПа	удельное сцепление;
φ_u	град	угол внутреннего трения грунта;

u	кРа	поровое давление, напряжение, возникающее в воде, заполняющей поры грунта когда он находится в состоянии полного водонасыщения;
σ	кРа	нормальное напряжение, действующее перпендикулярно данной площадке;
σ'	кРа	эффективное нормальное напряжение, действующее между частицами грунта в местах их контакта;
ϵ		Линейная деформация, определяемая как отношение приращения длины к первоначальной длине;
μ		коэффициент Пуассона: Отношение между изменениями линейных деформаций в направлениях перпендикулярно и параллельно при данном одноосном напряженном состоянии.
E	кРа	модуль деформации, определяемый как отношение между нормальным напряжением и деформацией в направлении действия напряжения;
E_{oed}	кРа	модуль деформации, определяемый по данным испытаний грунтов в компрессионном приборе;
c_v	$m^2/год$	коэффициент консолидации в вертикальной плоскости при одномерном напряженном состоянии,
c_h	$m^2/год$	коэффициент консолидации в горизонтальном направлении; $c_v = k \cdot E_{oed} / \gamma_w$,

	H	длина пути фильтрации, равная толщине слоя грунта при односторонней фильтрации или половине толщины слоя грунта при двухсторонней фильтрации;
	T_v	фактор времени, определяемый из соотношения $T_v = t \cdot c_v / H^2$
t	сек	время, прошедшее с момента приложения нагрузки;
	U	степен консолидации, определяемая как отношение приращения эффективного напряжения за данный промежуток времени к конечному значению эффективного напряжения.
2	ПОДСТИЛАЮЩИЕ СЛОИ, ТРЕБУЮЩИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ИХ СВОЙСТВ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ	

Закрепление и предварительное уплотнение слабых сильно-сжимаемых грунтов предварительным нагружением перед началом строительных работ выполняются в том случае, когда грунты подвергаются большим изменениям объема и под действием статических нагрузок прочность их увеличивается при наличии достаточного времени, необходимого для протекания процесса сжатия. Для ускорения этого процесса могут использоваться пригрузки, т.е. Дополнительные нагрузки превышающие или равные нагрузкам от сооружения. Если для уплотнения необходимо продолжительное время, то используются вертикальные дренажи или известковые колонны, позволяющие сократить сроки консолидации.

Предварительное уплотнение с наибольшим эффектом может быть использовано для следующих типов грунтов:

- водонасыщенные слабые глины;
- сильносжимаемые илы;
- заторфованные глинистые грунты;
- торф

Наибольший эффект от использования вертикальных дрен достигается в случае их применения в незаторфованных глинистых грунтах и илах, при небольших величинах осадок, вызванных вторичной консолидацией.

Глубинная стабилизация грунта с помощью известковых колонн с наибольшим эффектом может быть использована для уплотнения заиленных глин с низкими показателями пластичности, а также глинистых отложений, покрытых водой или заросших болотной растительностью при небольших коэффициентах заторфованности (менее 8 %).

3 ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

3.1 Отбор образцов

Специфические особенности слабых водонасыщенных грунтов, заключающиеся в их избыточной влажности, высокой пластичности, слоистости структуры, анизотропии их свойств, обуславливают применение особых методов отбора проб для проведения лабораторных исследований, а также особых методов для определения физико-механических свойств таких грунтов в лабораторных условиях.

Отбор образцов слабого водонасыщенного грунта ненарушенной структуры следует производить из скважин с помощью разработанных для этих целей грунтоносов, оснащенных специальными гильзами для приема грунта и затворными устройствами исключающими трение о их стенки и нарушение структуры грунта при транспортировке из скважины. Особые меры должны быть приняты по упаковке образцов и недопущению каких-либо динамических воздействий на образцы грунта в период их отбора и транспортировки в лабораторию.

Количество отбираемых образцов грунта для последующих лабораторных исследований назначается в соответствии с действующими нормативными документами, а при их отсутствии – определяется организацией, осуществляющей разработку проекта уплотнения слабых водонасыщенных грунтов.

При уплотнении грунтов с использованием вертикальных дрен следует отбирать не менее двух образцов грунта с каждой предусмотренной глубины для последующего определения консолидационных свойств в вертикальном и горизонтальном направлениях. Ориентация образцов по отношению к напластованиям должна обязательно фиксироваться при отборе.

Перечень основных показателей физико-механических свойств слабых водонасыщенных грунтов, которые должны быть определены для проектирования работ по их уплотнению приведены в табл.

1.

Таблица 1. Характеристики грунта требуемые для расчета и проектирования вертикального дренажа.

Показатели свойств грунтов	Метод определения		Образцы	
	полевой	лабораторный	ненаруш. структуры	наруш. структуры
Природная влажность		+ох	+ох	+ох
Объемный вес		+ох	+ох	
Плотность частиц		+ох		+ох
Показатели пластичности		+ох		+ох
Коэффициент пористости		+ох	+ох	
Модуль деформации	+ох	+ох	+ох	
Сопротивление сдвигу	+ох	+ох	+ох	
Сцепление		+ох	+ох	
Угол внутреннего трения		+ох	+ох	
Коэффициент консолидации	+ох	+ох	+ох	
Примечания: 1. +) для предварительного уплотнения ; для вертикального дренажа ; х) для глубинной стабилизации 2. определяется только при необходимости расчетов устойчивости.				

С целью уточнения границ расположения слоев слабых грунтов следует применять статическое зондирование или другие методы, позволяющие оперативно устанавливать эти границы в полевых условиях.

Изменение прочностных характеристик слабых водонасыщенных грунтов следует определять по результатам их испытаний в полевых условиях приборами вращательного среза.

3.2 Особенности лабораторных исследований свойств слабых водонасыщенных грунтов

Определение прочностных характеристик слабых водонасыщенных грунтов в лабораторных условиях рекомендуется проводить по неконсолидированно-недренированной схеме испытаний.

Испытания на срез следует проводить при эффективных давлениях изменяющихся по величине от природных значений, до давлений, на 10 - 20% превышающих давления от действия предполагаемой нагрузки от сооружения или насыпи.

При проведении лабораторных исследований нагрузки на образцы слабых водонасыщенных грунтов следует прикладывать ступенями, не превышающими 0,02 кПа вплоть до давлений 0,1 кПа и далее ступенями по 0,05 кПа.

Каждая ступень давлений должна быть выдержана до наступления условной стабилизации осадки образца грунта, за которую принимается осадка, не превышающая 0,01 мм за 12 часов наблюдений.

Деформативные характеристики слабых водонасыщенных грунтов в лабораторных условиях определяются по результатам их компрессионных испытаний на образцах грунта ненарушенной структуры с природной плотностью и влажностью. Для компрессионных испытаний отношение высоты образца к его диаметру должно быть не менее 1:4 и образец должен иметь диаметр не менее 50 мм.

Модуль деформации слабых водонасыщенных грунтов следует определять в интервале давлений, соответствующих фактическим давлениям от насыпей, используемых для уплотнения.

Коэффициенты консолидации слабых водонасыщенных грунтов в вертикальном и горизонтальном направлениях следует определять по данным испытаний в компрессонных приборах. Коэффициенты консолидации должны быть определены для тех ступеней нагрузок, которые будут использованы при проведении работ по уплотнению грунтов на строительной площадке.

4 МЕТОДЫ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СТРОИТЕЛЬСТВА

4.1 Уплотнение с помощью временной нагрузки до начала строительства

4.1.1 Виды предварительных нагрузок

Любое мероприятие которое ведет к выдавливанию поровой воды и сжатию слоя слабого грунта может быть использовано как предварительное нагружение.

Для предварительного нагружения больших площадей рекомендуется применять насыпи из местного грунта, запруженную воду и понижение уровня грунтовых вод.

Вода в резервуарах, вакуумное предварительное нагружение путем откачивания воздуха из-под непроницаемой пленки, положенной на поверхность грунта, устройство анкерных систем или систем домкратов могут быть использованы для уплотнения слабых грунтов в особых случаях.

Предварительное нагружение вакуумированием и понижением уровня грунтовых вод может использоваться в том случае, когда другие методы предварительного нагружения не могут быть использованы исходя из условий обеспечения устойчивости основания.

4.2 Консолидация слабых водонасыщенных грунтов путем предварительного нагружения с использованием вертикального дренирования

4.2.1 Область применения вертикального дренажа

Вертикальные дренажи следует применять во всех тех случаях, где имеется достаточно времени для создания нагрузки или когда скорость увеличения прочности грунтов в процессе уплотнения слишком мала для того, чтобы обеспечить быстрое возведение насыпи.

В грунтах, компрессия которых доминирует над первичной консолидацией, скорость осадки можно ускориться применением вертикальных дренажей, потому что время консолидации варьируется с квадратным корнем расстояния дренирования и потому что для большинства отложений проницаемость в горизонтальном направлении больше чем в вертикальном направлении.

Вертикальный дренаж эффективен в том случае, когда сжимаемость слабых водонасыщенных грунтов определяется в основном первичной консолидацией.

Вертикальные дренажи менее эффективны в торфах, заторфованных глинистых грунтах и других грунтах, развитие осадки которых зависит от вторичной консолидации.

4.2.2 Песчаные дренажи

Традиционные песчаные дренажи изготавливаются путем засыпки песка в вертикальную скважину, изготовленную в грунте. Вертикальные песчаные дренажи, обычно диаметром от 150 до 600 и расположенные на расстоянии от 1 м до 6 м между их центрами, изготавливаются либо путем погружения закрытого пробойника для изготовления скважины в грунте, либо с использованием водяной струи для образования скважины.

Дрены, изготавливаемые с помощью пробойника, обычно устраивают значительно быстрее, но при этом может быть нарушен и ослаблен окружающий грунт, в результате чего условия дренажа могут быть ухудшены. В результате применения водяной струи образуются дрены неправильной формы, и таким образом трудно определить их действительный размер и соответственно эффективный радиус. При проходке скважин с помощью водяной струи особое внимание должно быть уделено размещению вымытого струей грунта с тем, чтобы избежать загрязнения окружающего пространства, протекающих рядом рек, близлежащих озер и водоемов. Чтобы исключить заклинивание песка во время его засыпки в дренаж, избежать образования пустот и проседаний, необходимо уделять внимание тому, чтобы песок во время укладки в скважину был водонасыщен.

4.2.3 Дрены заводского изготовления

Существует несколько типов плоских дрен, состоящих из пластмассового сердечника, обернутого тонким слоем фильтрующей бумаги. Необходимо, чтобы в сердечнике были каналы для тока воды, он был прочным и не разрушался на глубине от давления грунта. В качестве оберточного материала используется специальным образом обработанная бумага и нетканые материалы, изготовленные из полипропилена, полиэстера, полиэтилена. Такие материалы зарекомендовали себя как хорошие фильтры, гарантируют от вдавливания мелких частиц и засорения дренажных каналов в сердечнике. Хотя проницаемость этих материалов может изменяться от $K = 2 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-9}$ они обеспечивают небольшое сопротивление фильтрации. Плоские дрены обычно погружаются в грунт с использованием полых сердечников прямоугольного, трапециевидного или круглого поперечного сечения. Погружающее оборудование должно быть достаточно мощным, чтобы обеспечить вдавливание и выдергивание сердечника. Сопротивление вдавливанию в большой степени зависит от размера сердечника, типа накопника и от прочности грунта.

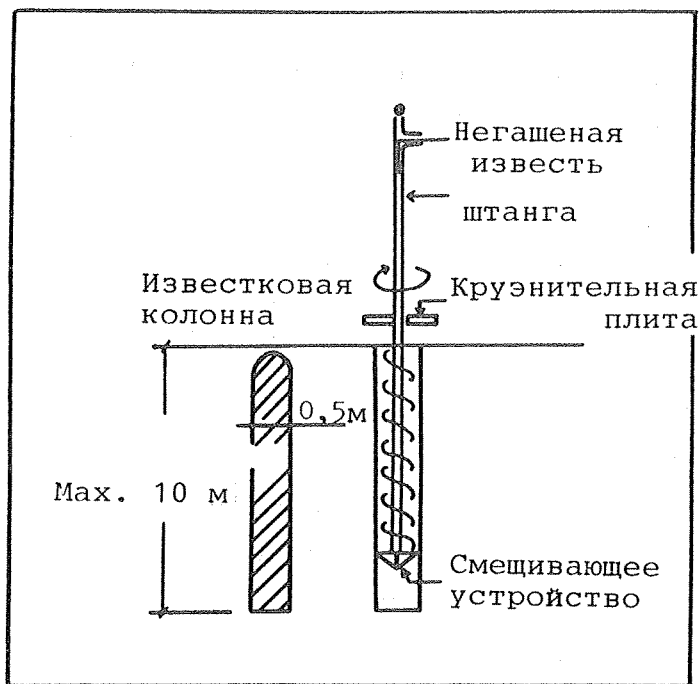


Рис. 1 а. Изготовление известковых колонн.

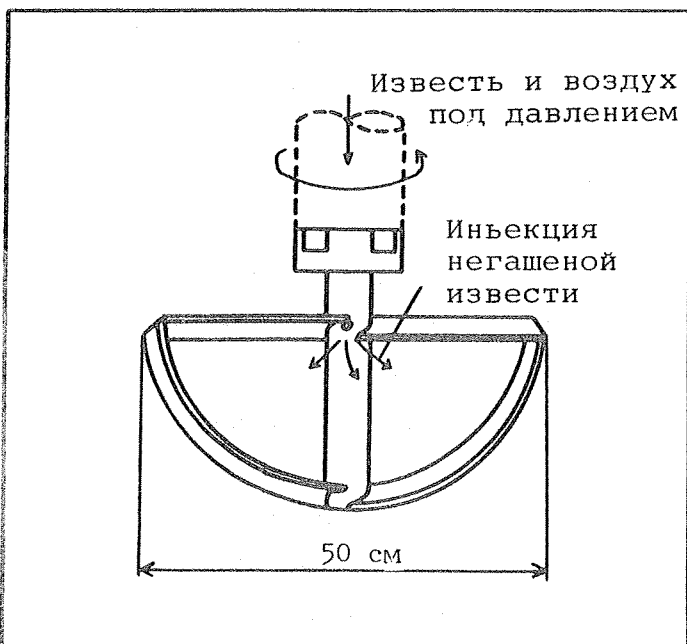


Рис. 1 в. Смешивающее устройство. Положение ножей соответствует погружению со скоростью 100 мм/об.

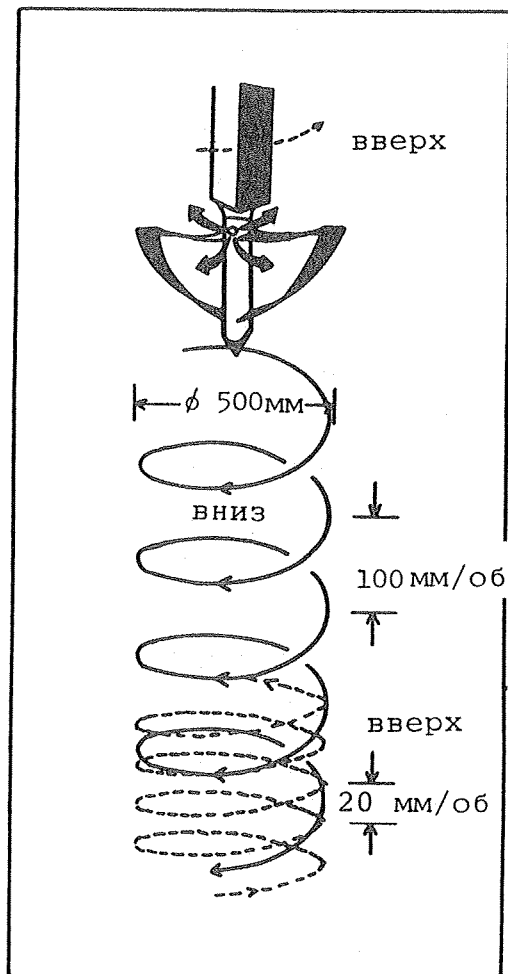


Рис. 1 с.

Принцип глубинной стабилизации грунта. Негашеная известь подается в грунт одновременно с вращением при подъеме прибора вверх.

Приблизительный размер плоских дрен 100 x 4 рассчитан на то, чтобы выдерживать статическую нагрузку около 280 кН, необходимую для погружения дрены в грунт.

4.3 Уплотнение глубинной стабилизацией с помощью известковых колонн

Известковые колонны изкавливают путем нагнетания определенного количества стабилизатора (негашенной извести и определенных добавок) в слой слабой глины через вращающийся бур оборудованный специальным режущим инструментом, предназначенным как для проникновения на необходимую глубину так и для смешивания грунта с известью и добавками во время его извлечения. На рис. 1. схематически показана диаграмма процесса изготовления известковой колонны. Диаметр известковой колонны 0,5 м. является стандартным и существующее оборудование способно изготавливать колонны длиной до 10 м.

К извести могут добавляться специальные химикаты для того, чтобы увеличить стабилизирующей эффект. Когда в качестве стабилизатора используется обожженная известь (CaO), тепло от гидротации может быть значительным, и в следствие этого может произойти значительное осушение окружающего грунта. Добавки обычно составляют от 50 до 15% (по весу грунта в сухом состоянии). Конечная прочность после обработки во много раз больше чем у необработанного грунта. Прочность при этом может быть увеличена в 5 - 20 раз. Скорость твердения будет зависеть от температуры грунта. Если химические реакции происходят в грунте, имеющем температуру ниже $+4^{\circ}\text{C}$, то скорость увеличения прочности будет чрезвычайно мала. Грунтовые колонны, стабилизированные известью, имеют обычно в 100 - 1000 раз большую проницаемость чем грунт в необработанном пласте. Как следствие, колонны могут действовать как вертикальные дрены, ускоряя таким образом развитие осадки.

В зимнее время может понадобиться предварительное бурение, когда грунт находится в мерзлом состоянии или когда нужно устроить известковые колонны под уже отсыпанной насыпью.

5 ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ОСАДОК И СКОРОВ КОНСОЛИДАЦИИ
ПРИ УПЛОТНЕНИИ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН

В качестве расчетной схемы для определения величины осадки слоя слабого грунта при его уплотнении насыпью следует принимать условие вертикального сжатия этого слоя без возможности бокового расширения.

Определение конечных величин осадок и их развитие во времени следует определять для отдельных участков уплотняемой территории. Количество таких участков и их размещение в плане назначается в зависимости от степени однородности геологических напластований и деформационных свойств грунтов, подвергающихся уплотнению.

Вертикальные дрены из искусственных или природных материалов, принимаются как совершенные, т.е. полностью прорезающие слой уплотняемого слабого грунта.

В тех случаях, когда слой слабого грунта заключен между двумя дренирующими слоями и дрена полностью прорезает слой слабого грунта принимается, что уплотнение этого слоя происходит за счет отжатия воды из пор грунта в дрена и в оба фильтрующих слоя. Этот комбинированный процесс рассматривается как наложение двух фильтрационных потоков - вертикального, соответствующего одномерной задаче теории консолидации и горизонтального, соответствующего плоской осесимметричной задаче теории консолидации.

Поскольку на практике дрены располагаются в плане по треугольной или квадратной сетке, зона влияния дрен оказывается сложной. Для упрощения расчетов принимается круговая форма влияния дрен, диаметр которой определяется по формулам:

при расположении дрена по квадратной сетке

$$d_e = 1,13 d \quad (1)$$

при расположении дрена по треугольной сетке

$$d_e = 1,05 d \quad (2)$$

в которых d расстояние между осями дрена.

При этом принимается, что поверхность цилиндра диаметром d_e водонепроницаема, а материал дрена является идеально проницаемым.

Таблица 2. Зависимость соотношенного среднего дополнительного давления от факторов времени.

T_v	Относительное среднее избыточное давление $\bar{U}_z/\alpha \cdot t$ для слоя торфа при двустороннем дренаже и при равном		
	0,1	0,2	0,3
0,00	1,00	1,00	1,00
0,05	0,83	0,83	0,83
0,10	0,76	0,76	0,76
0,20	0,56	0,66	0,66
0,30	0,44	0,50	0,59
0,40	0,34	0,39	0,45
0,50	0,27	0,31	0,35
0,60	0,21	0,24	0,27
0,70	0,16	0,19	0,21
0,80	0,13	0,14	0,17
0,90	0,10	0,12	0,13
1,00	0,08	0,09	0,10
1,10	0,06	0,07	0,08
1,20	0,05	0,05	0,06
1,30	0,04	0,04	0,05
1,40	0,03	0,03	0,04
1,50	0,03	0,02	0,03
1,60	0,02	0,02	0,02
1,70	0,01	0,02	0,02
1,80	0,01	0,01	0,01
1,90	0,01	0,01	0,01
2,00	0,01	0,01	0,01

Примечание: для промежуточных значений \bar{T} и \bar{T}_v величина $U_z/\alpha t$ определяется интерполяцией.

Осадка слоя слабого грунта во времени определяется по формуле:

$$S_t = U_v \cdot S_{\infty}, \quad (3)$$

где S_{∞} величина конечной осадки слоя слабого грунта в стабилизированном состоянии, определяемая для случая сжатия без возможности бокового расширения на основе результатов компрессионных испытаний грунтов;

U_v степень консолидации.

Величину степени консолидации рекомендуется определять по формуле:

$$U_v = 1 - \frac{\bar{u} z}{\alpha \cdot t}, \quad (4)$$

где $\frac{\bar{u} z}{\alpha \cdot t}$ Относительное среднее избыточное давление, определяемое по табл. 2 в зависимости от факторов времени T_v и \bar{T}_v .

Значения факторов времени T_v и \bar{T}_v рекомендуется вычислять по формуле:

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t \quad (5)$$

и

$$\bar{T}_v = \frac{c_v}{H^2} \bar{t}, \quad (6)$$

в которых c_v коэффициент консолидации при фильтрации воды в вертикальном направлении, $m^2/год$;

H длина пути фильтрации, м, принимаемая :

- при двухстороннем дренаже равной половине толщины слоя слабого грунта, подвергающегося уплотнению,
- при одностороннем дренаже равной толщине слоя слабого грунта, подвергающегося уплотнению ;

t заданное время консолидации, год ;
 \bar{t} время, необходимое для формирования постоянной нагрузки на слой слабого грунта, год.

Время, необходимое для уплотнения слоя слабого водонасыщенного грунта до заданной степени консолидации при постоянной нагрузке вычисляется в соответствии с формулой (5).

При использовании вертикальных дрен, полностью прорезающих слой слабого грунта и наличии дренирующих слоев на концах дрен, определение степени консолидации рекомендуется производить с учетом фильтрации воды в горизонтальном и вертикальном направлениях по формуле (7).

$$U_{vh} = 1 - (1 - U_v) (1 - U_h) \quad (7)$$

где

U_{vh} степень консолидации с учетом вертикальных и горизонтальных потоков поровой воды ;

U_v степень консолидации при фильтрации поровой воды в вертикальном направлении, определяемая в соответствии с указаниями п. 4 настоящих Рекомендаций ;

U_h степень консолидации при фильтрации поровой воды в горизонтальном направлении, определяемая в соответствии с указаниями п. 8 настоящих Рекомендаций.

При практически мгновенном приложении нагрузки степень консолидации, происходящей только за счет использования вертикальных дрен, определяется в предположении, что горизонтальные дренирующие слои на концах дрен отсутствуют, по формуле (8).

$$U_h = 1 - \exp \frac{- 8 T_h}{F (\beta)} , \quad (8)$$

где

T_h фактор времени при наличии фильтрации только в горизонтальном направлении, определяемый в

соответствии с указаниями п. 9 настоящих
Рекомендаций ;
 $F_{(\beta)}$ величина, зависящая от отношения диаметра зоны
влияния дрены к диаметру дрены, определяемая в
соответствии с указаниями п. 10 настоящих Реко-
мендаций.

Значения фактора времени при фильтрации поровой воды только
в горизонтальном направлении определяется по формуле :

$$T_h = \frac{c_h}{(d_e)^2} t , \quad (9)$$

где

c_h коэффициент консолидации при фильтрации поровой
воды в горизонтальном направлении, $m^2/год$;
 t время от момента приложения нагрузки, год ;
 d_e диаметр зоны влияния дрены, м.

Значение $F_{(\beta)}$ определяется по формуле :

$$F_{(\beta)} = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \ln \beta - \frac{3\beta^2 - 1}{4\beta^2} , \quad (10)$$

где

$\beta = \frac{d_e}{d_o}$ отношение диаметра зоны влияния к диаметру
дрены.

При использовании дрен из искусственных материалов значение
 d_o принимается равным 0,05 - 0,06 м.

Значение степени консолидации U_h в зависимости от факторов
времени могут быть определены по табл. 3 для разных значе-
ний β .

Таблица 3. Зависимость степени консолидации (U_h) от фактора времени T_h при мгновенном нагружении основания с вертикальными дренами.

U_h	T_h					
	$\beta = 3$	$\beta = 5$	$\beta = 10$	$\beta = 15$	$\beta = 20$	$\beta = 25$
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,007	0,012	0,021	0,026	0,030	0,033
0,2	0,014	0,026	0,040	0,055	0,063	0,069
0,3	0,023	0,042	0,070	0,088	0,101	0,170
0,4	0,033	0,060	0,101	0,126	0,144	0,158
0,5	0,045	0,081	0,137	0,171	0,195	0,214
0,6	0,059	0,107	0,181	0,226	0,258	0,283
0,7	0,077	0,141	0,238	0,297	0,339	0,372
0,8	0,103	0,188	0,318	0,397	0,454	0,498
0,9	0,148	0,270	0,454	0,567	0,649	0,172
0,95	0,192	0,351	0,591	0,730	0,444	0,927
0,99	0,296	0,539	0,909	1,135	0,298	1 424

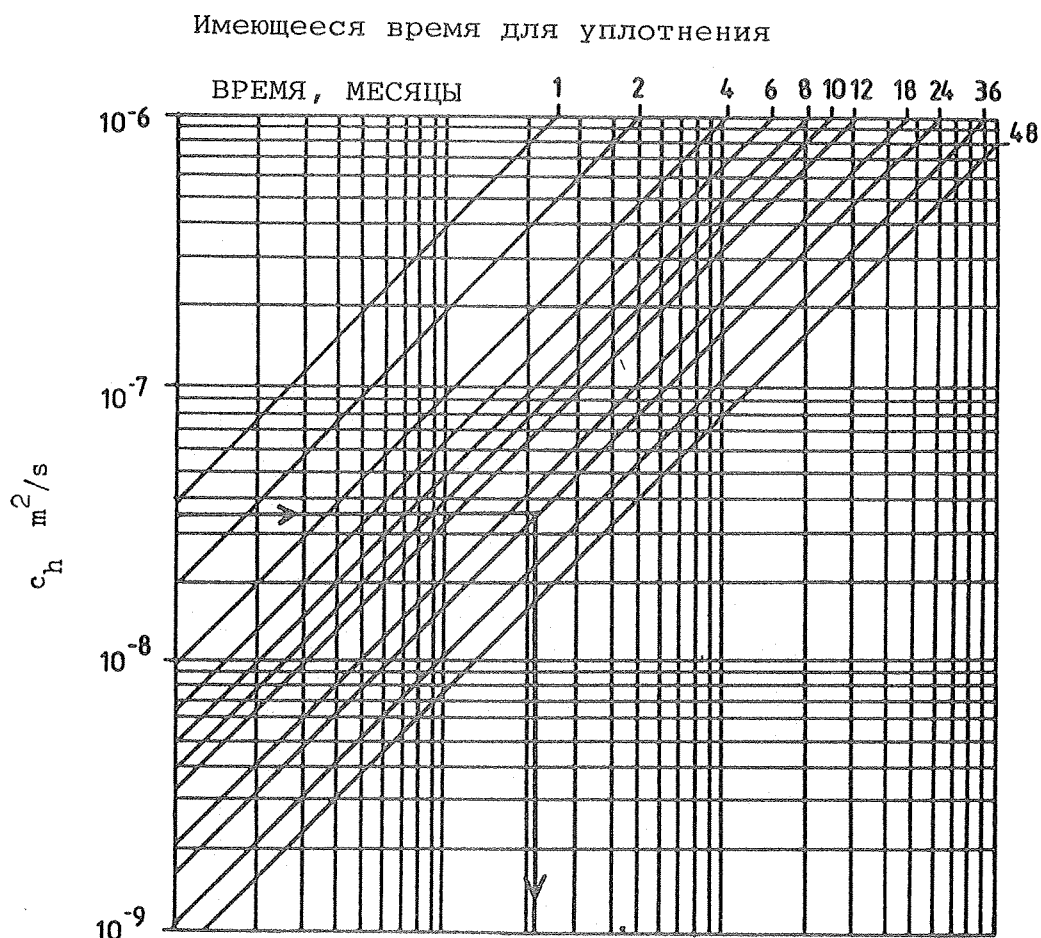
5.1 Расчет осадки и сроков консолидации при применении глубинного уплотнения с помощью известковых колонн

5.1.1 Общие осадки

Расчет общих осадок группы известковых колонн должен быть выполнен как показано на рис. 3.

В расчетах предполагается, что максимальная общая осадка соответствует сумме местных осадок укрепленного массива Δh_1 , и грунта под массивом Δh_2 .

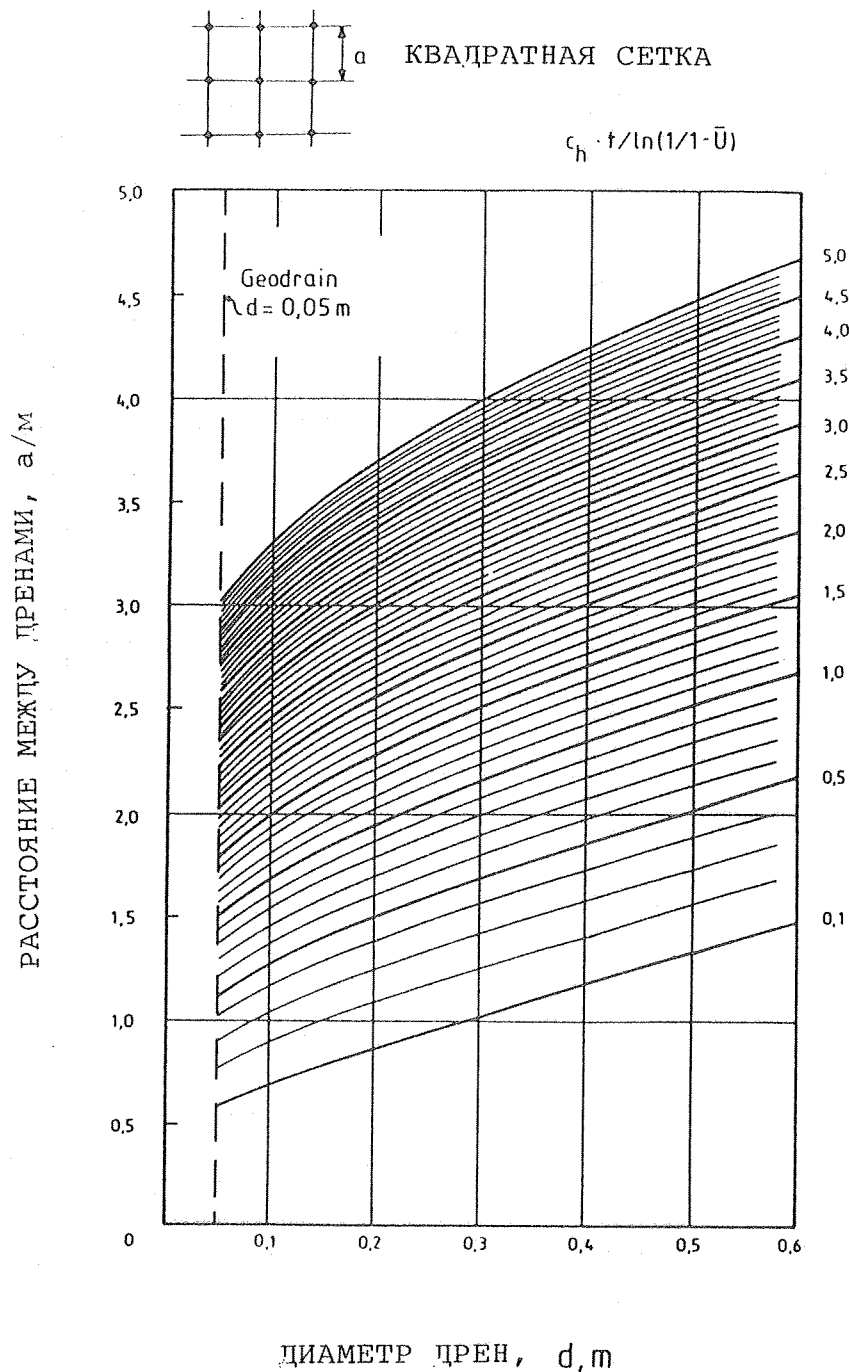
Коефициент консолидации
в горизонтальном направлении



Пример использования
диаграммы



Рис. 2. Диаграммы для быстрого определения целесообразных расстояний между дренами при вертикальном дренаже. (продолжается на следующей странице)



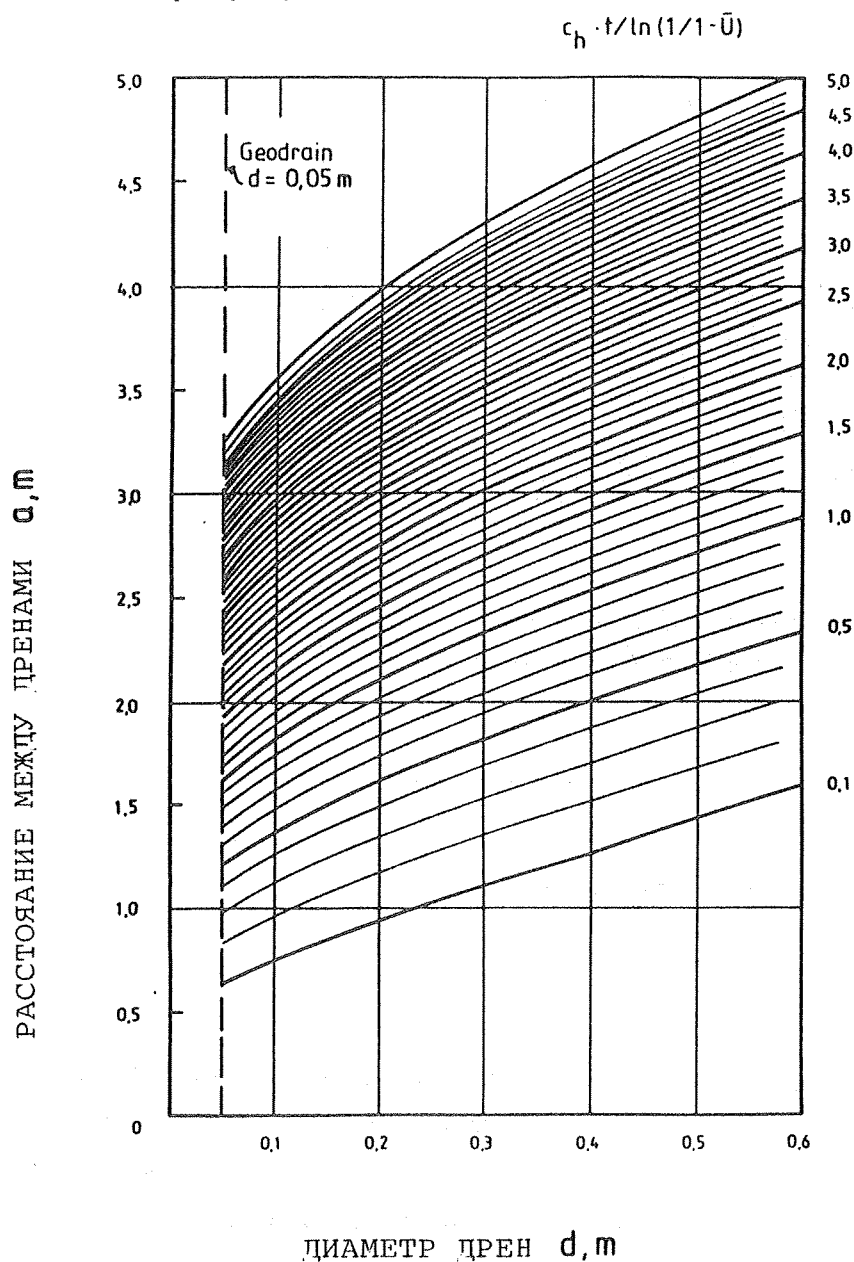
Пример: Коэффициент консолидации в горизонтальном направлении $c_h = 3 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Имеющееся время (Рис. 2) для уплотнения 24 месяца.

Необходимая степень консолидации $\bar{U} = 80\%$ $c_h \cdot t / \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{U}} \right) = 2,0$.

Диаметр дрен $d = 0,1 \text{ м}$. Результат: Расстояние между дренами : $a = 2,25 \text{ м}$ (квадратная сетка).



ТРЕУГОЛЬНАЯ СЕТКА



Пример: Коэффициент консолидации в горизонтальном направлении
(Рис.2) $c_h = 3 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Имеющееся время для уплотнения 24 месяца.

Необходимая степень консолидации $\bar{U} = 80\% = c_h \cdot t / \ln\left(\frac{1}{1-\bar{U}}\right) = 2,0$. Диаметр дрен $d = 0,1 \text{ м}$

Результат: Расстояние между дренами : $a = 2,4 \text{ м}$
(Треугольная сетка).

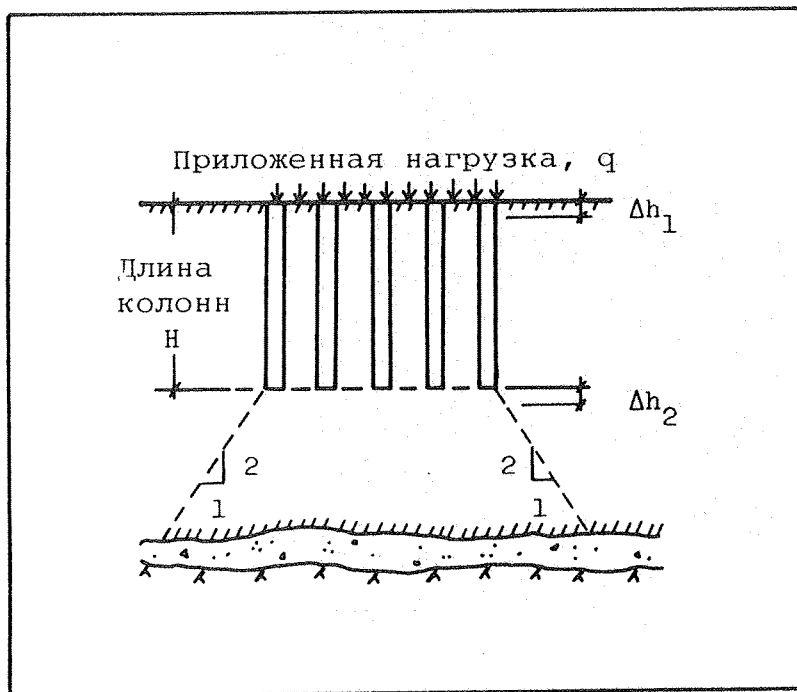


Рис. 3 Определение общих осадок.

5.1.2 Случай А :

Приложенная нагрузка и местные осадки закрепленного массива будут настолько велики, что превысят предел текучести $Q_{пр}$ колонны. Для этого случая приложенная нагрузка разделяется на две части, q_1 и q_2 , где q_1 воспринимается известковыми колоннами, а q_2 грунтом между колоннами. Нагрузка q_1 зависит от предела текучести колонн $q_1 = n \cdot Q_{пр} / B \cdot L$, где n общее число колонн, а B и L соответственно ширина и длина загруженной площади. Условный предел текучести колонн соответствует 70% предела прочности, которое получается при испытаниях кратковременными нагрузками. Предел текучести и несущая способность колонн будет равномерно увеличиваться во времени (Рис. 4).

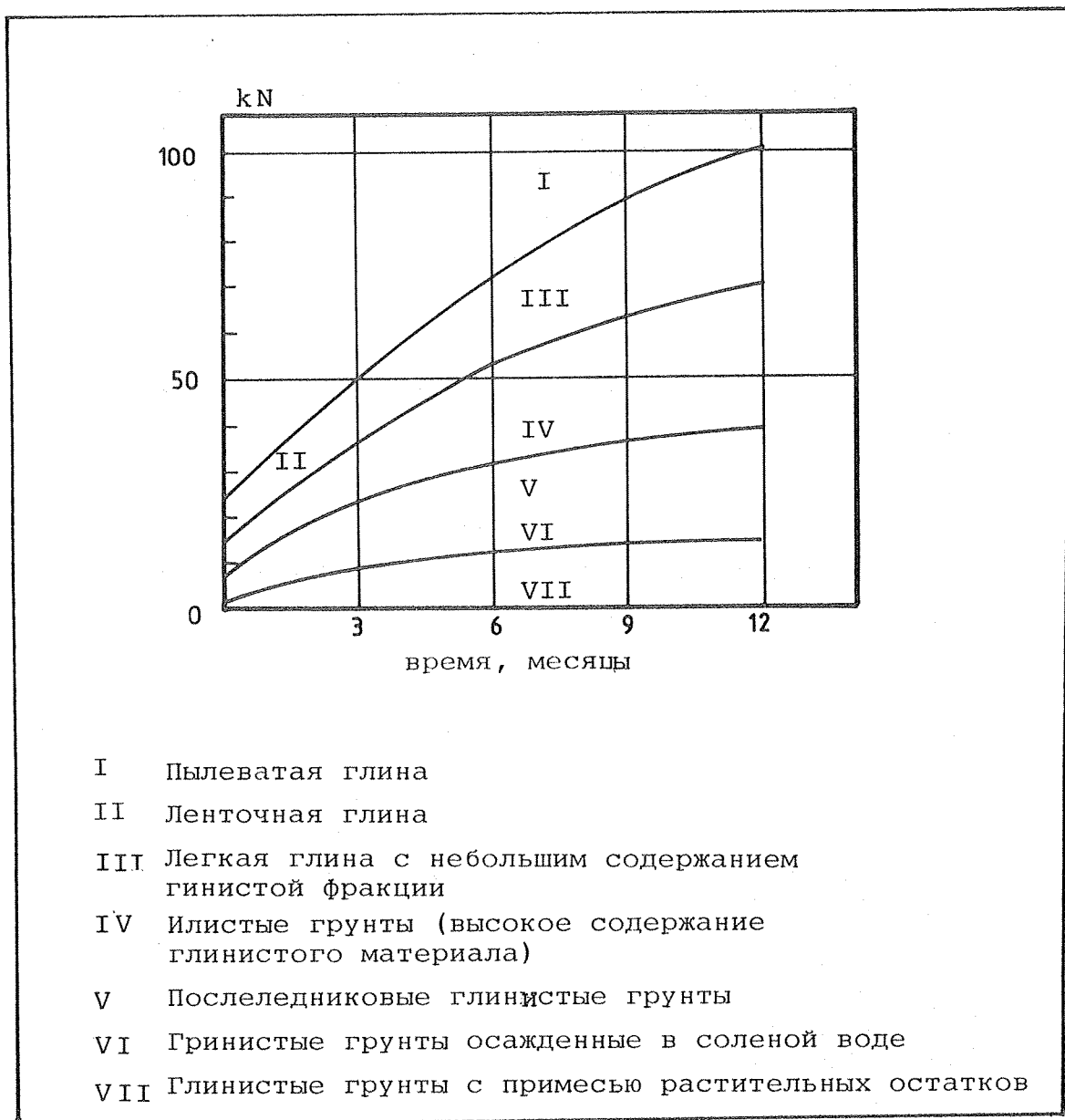


Рис. 4. Оценка предельной прочности известковых колонн.

Местная осадка блока (Δh_1) будет затем определяться нагрузкой q_2 ($q_2 = q - q_1$), которая воспринимается необработанным грунтом между колоннами. Эта осадка может быть определена обычными методами с использованием результатов компрессионных испытаний грунтов.

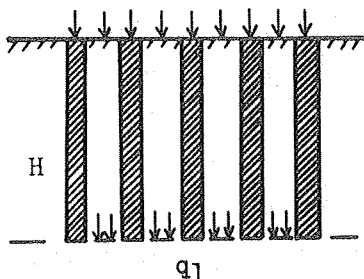
Расчет увеличения результирующей предполагается проводить по методу 2 : 1, как показано на рис. 5. Необработанный грунт внутри массива разделяется на слои и отдельно оценивается сжимаемость каждого слоя.

Местная осадка грунта под укрепленным массивом вычисляется при увеличении напряжения, вызванного нагрузкой q_1 , которая передается на основание укрепленного массива, и приращением нагрузки q_2 , которая передается через необработанный грунт между колоннами. Вычисления должны быть сделаны отдельно для нагрузок, поскольку они действуют на двух разных уровнях в грунте.

Предполагается, что изменение напряжений в этом случае также определяется по методу 2 : 1.

Местная осадка под массивом может быть вычислена путем разделения грунта на слои. Сжимаемость каждого слоя вычисляется при действии напряжения, вызванного нагрузками q_1 и q_2 .

а)
Приложенная нагрузка $q_1 = \frac{Q_{\text{yield}}}{B \cdot L}$



а) нагрузка воспринимаемая известковыми колоннами

б)
Приложенная нагрузка $q_2 = q - q_1$



б) нагрузка, воспринимаемая неуплотненным грунтом между колоннами

Рис. 5. Распределение нагрузки для расчета осадок в случае а, когда превышена прочность известковых колонн.

5.1.3 Случай В

Деформация блока настолько мала, что предел текучести известковой колонны не превзойден. Относительная жесткость колонн по сравнению с жесткостью окружающего необработанного грунта между колоннами в этом случае будет определять осадку массива в целом. В этом случае относительная деформация колонны и грунта между колоннами будет одинакова. Поэтому рекомендуется вычислять изменение напряжений в массиве при общей приложенной нагрузке по методу 2 : 1. Средний модуль деформации $M_{av} = (d\sigma / d\epsilon)$ сжимаемого материала в массиве зависит от относительного модуля деформации материала колонны ($E_{кол}$) и модуля деформации необработанного грунта между колоннами ($M_{гр}$). Этот средний модуль деформации следует определять по формуле :

$$M_{av} = (1 - a) M_{гр} + a E_{кол} , \quad (11)$$

где

$a = n \cdot A_{кол} / B \cdot L$ относительная площадь колонн ;

n общее число колонн ;

$A_{кол}$ площадь колонн ;

$B \cdot L$ ширина и длина нагруженной площади.

Эквивалентный модуль упругости материала колонн с учетом эффекта времени может быть определен соотношения :

$$E_{кол} = 250 \cdot c_{u, кол} , \quad (12)$$

где

$c_{u, кол}$ сопротивление сдвигу материала колонны в недренированном состоянии.

Модуль деформации необработанного грунта между колоннами может изменяться в зависимости от многих факторов, например, в результате понижения уровня грунтовых вод. В том случае, когда предконсолидационная нагрузка не будет превышена, модуль деформации этого грунта определяют из соотношения.

$$M_{гр} = 250 \cdot c_u, \quad (13)$$

где

c_u — сопротивление сдвигу необработанного грунта при недренированных испытаниях.

В тех случаях, когда глинистые грунты относятся к нормально консолидированным или предконсолидационное давление будет превышено, модуль деформации грунта следует определять по результатам компрессионных испытаний. Местная осадка грунта под укрепленным массивом вычисляется при нагрузке, приложенной на поверхности грунта путем разделения грунта под укрепленным массивом на отдельные слои и вычисления сжатия каждого слоя.

5.1.4 Скорость осадки

Поскольку известковые колонны действуют как вертикальные дрены в грунте, для вычисления скорости осадки известковых колонн используют метод Баррона (1984), разработанный для песчаных дрен. Проницаемость слабых глинистых грунтов увеличивается в 100 - 1 000 раз, когда грунт смешивается с негашеной известью. Это увеличение достаточно, чтобы сделать материал колонны более проницаемым по отношению к окружающему необработанному грунту. В случае, если известковые колонны не полностью прорезают слой слабого водонасыщенного грунта, колонны из стабилизированного грунта будут действовать как дрены вплоть до глубины их проникновения, а также как дренирующий слой по отношению к слоям грунта, расположенных ниже основания колонн.

Влияние предварительного нагружения на скорость осадки может быть определено в соответствии с принципами, представленными на рис. 6.

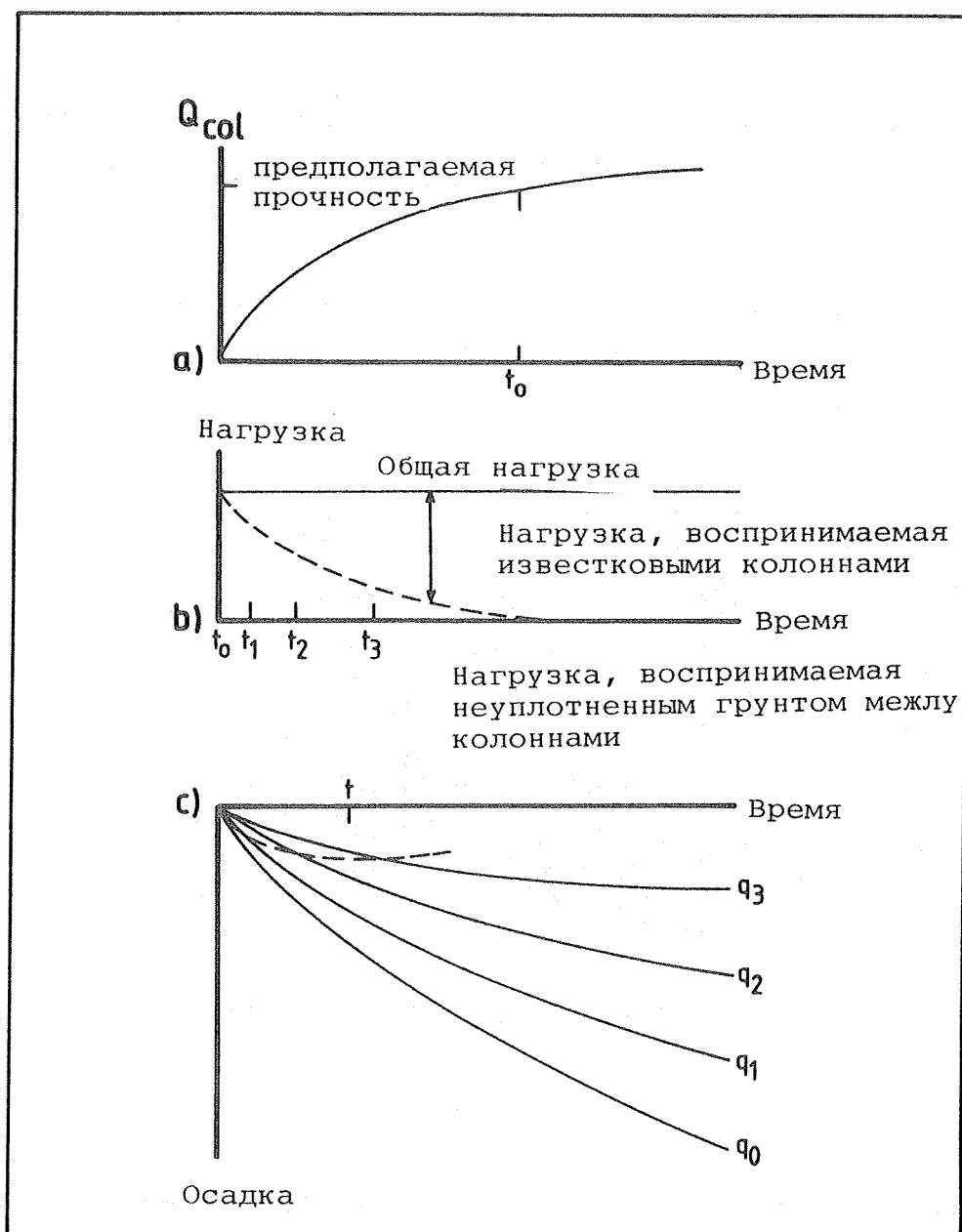


Рис. 6. Влияние предварительного нагружения на скорость осадки.

5.2 Требования к материалу

5.2.1 Песок для песчаных дрен

Для того, чтобы гарантировать хорошую проницаемость, гранулометрический состав песка должен соответствовать градации, представленной на рис. 7.

Частицы по весу меньше 60 мкм не должны превышать 2%. Песок должен быть без каких-либо органических примесей, солей и цементирующих материалов.

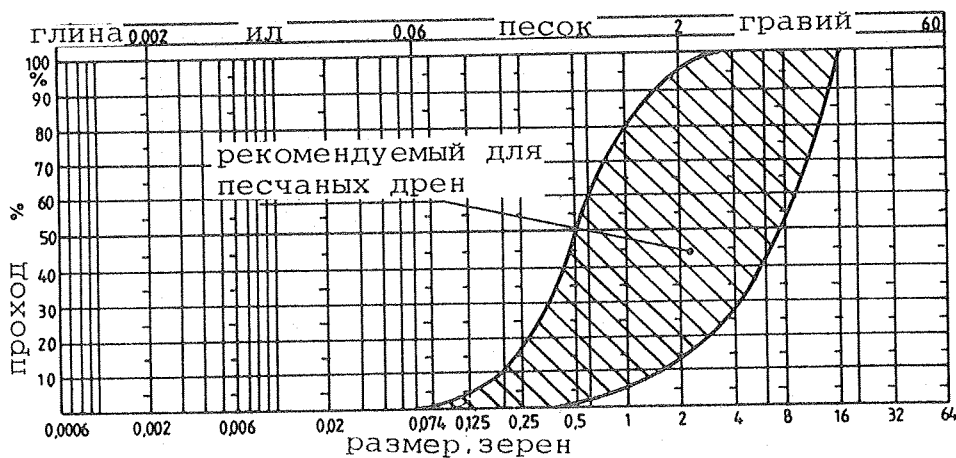


Рис. 7. Рекомендуемый материал для песчаных дрен.

5.2.2 Дрены заводского изготовления

Пластмассовые сердечники дрен заводского изготовления должны быть сделаны из материала, который не будет разрушаться или становиться хрупким в период эксплуатации дрены и который будет достаточно прочным и гибким, чтобы противостоять напряжениям и деформациям, возникающим при погружении. При оборачивании фильтровальными материалами, их форма должна обеспечивать достаточную гидравлическую проницаемость. Обработанная бумага и изготовленные фильтры должны иметь идеально высокую проницаемость и высокую фильтрационную способность. Используемые бумаги и нетканый материал,

являются тонкими и их сопротивление просачиванию воды обычно очень невелико ; это и обеспечивает их фильтрационные свойства, которые очень важны.

Обычно используемые нетканые материалы изготовлены из полимеров, которые являются недостаточно стойкими к воздействиям ультрафиолетовых излучений. Поэтому важно, чтобы этот материал при складировании хранился в местах, исключающих прямое воздействие солнечных лучей.

6 ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УПЛОТНЕНИЮ СЛАБЫХ ВОДО-НАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН

6.1 Устройство вертикальных дрен

Перед началом работ по устройству вертикальных дрен на месте производства работ осуществляют :

- удаление с площадки строительства обломков бетона, древесины и другого строительного мусора ;
- отсыпку и планировку слоя песка или другого дренирующего материала толщиной $0,4 \div 0,5$ м ;
- разбивку точек расположения вертикальных дрен в плане ;
- подготовительные работы включающие подводку электроэнергии, доставку природных или искусственных материалов для дрен ;
- выполнение мероприятий, обеспечивающих сбор воды, поступающей на поверхность грунта в процессе уплотнения и ее удаления с территории, на которой осуществляется производство работ.

Для устройства вертикальных песчаных дрен используют инвентарную осадную трубу с наголовником для присоединения вибропогружателя, снабженную приемным бункером и раскрывающейся нижней частью. Диаметр осадной трубы рекомендуется выбирать не менее 0,3 м.

При устройстве песчаных дрен выполняются следующие операции:

- погружение в грунт с помощью вибропогружателя инвентарной обсадной трубы на проектную глубину ;
- заполнение погруженной инвентарной трубы песком или другим природным дренирующим материалом с добавлением, при необходимости, воды для обеспечения свободного выхода дренирующего материала из обсадной трубы при ее извлечении;
- вибрирование инвентарной обсадной трубы с одновременным извлечением ее из грунта.

При невозможности погружения обсадной трубы на проектную глубину в какой-либо точке из-за наличия в грунте твердых включений, обсадная труба извлекается, образованная скважина заполняется дренирующим материалом, после чего рядом осуществляется устройство дополнительной дрены.

Извлечение обсадной трубы из грунта осуществляется при работающем вибраторе с постоянной скоростью, примерно равной 10 м/мин. Выключение вибратора производится в момент, когда в грунте остается нижний конец трубы длиной не более 0,5 м.

При качественном изготовлении дрены, объем дренирующего материала, остающегося на поверхности после извлечения трубы из грунта не должен превышать 5% от объема дрены.

После завершения работ по устройству вертикальных дрен осуществляется послойная отсыпка нагрузочной насыпи. Толщина отдельных слоев насыпи не должна превышать 1,5 м.

При уплотнении слабых водонасыщенных грунтов на больших площадях, нагрузочную насыпь рекомендуется выполнять на отдельных участках с последующим перемещением материала насыпи на соседние участки. Размеры отдельных участков следует назначать из условий эффективного использования технических средств.

Если в процессе уплотнения в отдельных зонах будет обнаружено отклонение разития осадки территории по сравнению с другими зонами, эти отклонения ликвидируют путем изменения высоты нагружающей насыпи.

6.2 Глубинное уплотнение методом известковых колонн

На строительной площадке должны быть заранее выполнены следующие работы:

- все материалы : щебень, бетон, асфальт и лесоматериалы должны быть удалены со строительной площадки ;
- должна быть устроена площадка, на которой будет действовать специальное оборудование для грубинной стабилизации, путем засыпки и планировки песчаного слоя или другого дренажного материала толщиной 0,4 - 0,5 м ;
- разметка точек для устройства известковых колонн на спланированном дренирующем слое ;
- подготовительные работы включающие снабжение энергией, транспортировку стабилизирующего агента и подачу сжатого воздуха на стрительную площадку ;
- организация работ должна обеспечивать непрерывную подачу стабилизирующего агента в процессе производства работ.

При устройстве грунтовых колонн, стабилизированных известью должны быть выполнены следующие работы :

- ввинчивание бура в грунт на глубину, соответствующую длине колонны ;
- порошкообразная негашеная известь и необходимые добавки подают в грунт под давлением сжатого воздуха через отверстие, расположенное непосредственно над горизонтальной лопастью бура в то время, как бур вращается в обратном направлении и одновременно поднимается вверх ;
- для того, чтобы гарантировать тщательное перемешивание стабилизирующего агента с грунтом, скорость подъема инструмента, должна быть отрегулирована так, чтобы составлять $1/5$ скорости , при которой бур ввинчивается в грунт ;
- подача стабилизирующего агента должна быть остановлена в тот момент, когда бур находитсся на глубине 0,5 м. от

поверхности грунта.

Если грунтовые включения, присутствующие в подстилающем слое препятствуют проникновению бура на заданную глубину, бур должен быть извлечен с одновременной стабилизацией этой небольшой по размеру колонны, и дополнительная колонна должна быть сделана и стабилизирована рядом.

6.3 Производство работ по устройству вертикальных дрен в зимнее время

Уплотнение грунтов с использованием вертикальных дрен из природных материалов рекомендуется производить при температуре наружного воздуха не ниже -15°C .

При производстве работ в зимнее время должен быть обеспечен надежный отвод воды с территории, на которой осуществляется уплотнение и должно быть обеспечено бесперебойное снабжение механизмов электроэнергией и паром.

Дренирующий материал, используемый для изготовления вертикальных дрен, должен быть защищен от смерзания.

Если толщина слоя промерзающего грунта превышает 0,2 м, погружение инвентарной обсадной трубы следует осуществлять в лидерные скважины или в предварительно оттаиваемый грунт. Лидерные скважины рекомендуется проходить бурением или пробивкой. Оттаивание грунта может быть осуществлено с помощью электроили паропрогрева.

Поперечное сечение лидерной скважины или области оттаиваемого грунта должны быть не менее наружного диаметра обсадной трубы. Лидерные скважины или оттаивание должны быть осуществлены на всю глубину промерзшего грунта.

Для предотвращения промерзания грунта обсадная труба должна быть оборудована устройством ее подогрева. Дренирующий материал, подаваемый в трубу не должен иметь мерзлых комьев и кусков льда.

После изготовления дрен на поверхности грунта рекомендуется уложить теплоизолирующий слой.

для беспрепятственной осадки грунта, уплотняемого насылью в зимний период, площадки рекомендуется разбить на участки размерами 25 х 25 м и по границам участков прорезать траншеи на всю глубину промерзшего слоя грунта.



Vuorimiehentie 5
SF-02150 Espoo 15, Finland
phone internat. + 358 0 4561
telex 122972 vttha sf

VTI Research Reports 389 FI+VTITIED-84/389

Date Ноябрь 1984

Project number

321-4

Authors	Name of project	
Titel РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЦИОНАЛЬНЫМ МЕТОДАМ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ		
Abstract <p>В основу рекомендаций положены результаты совместных исследований, выполненных финскими и советскими специалистами по уплотнению и стабилизации слабых водонасыщенных грунтов с применением предварительного нагружения и глубинной стабилизации известковыми колоннами.</p> <p>Основная часть исследований была выполнена на территории Финляндии в Хельсинки. Вместе с тем при подготовке этих рекомендаций был использован опыт по уплотнению и стабилизации слабых грунтов с использованием вертикального дренажа и устройств колонн, стабилизированных известью, приобретенной советскими и финскими специалистами при освоении новых территорий для гражданского и промышленного строительства на слабых водонасыщенных грунтах. При подготовке этих рекомендаций был использован также опыт, приобретенный при освоении заболоченных территорий.</p>		
Activity unit Лаборатория геотехники, Лампомиехенкуя 2 В, 02150 Эспоо, Финляндия		
ISSN and key name 0358-5085 Tiedotteita - Valtion teknillinen tutkimuskeskus		
ISBN 951-38-2186-2	Language английский, русский, финский резюме	
Class (UDC) 624.137/.138	Key words consolidation, stabilization, water saturated soils, preloading, vertical drainage, deep stabilization, lime columns, recommendations, subsoils, compactions	
Sold by Government Printing Centre P.O. Box 516 SF-00101 HELSINKI 10 phone internat. +358 0 539011	Pages 83 с.	Price FIM 42
	Note	



Tekijä(t)	Projektin nimi	
	Toimeksiantaja Suomalais-neuvostoliittolainen tieteellis- teknillinen yhteistyökomitea	
<p>Nimeke</p> <p>SUOSITUKSET PEHMEIDEN VEDENKYLLÄSTÄMIEN MAAPOHJIEEN PARANTAMISEKSI PYSTYOJILLA</p>		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Suosituksset perustuvat suomalaisten ja neuvostoliittolaisten pohja- rakennusalan asiantuntijoiden tekemiin tutkimuksiin. Niissä selvi- tettiin esikuormituksen, pystyöjituksen ja kalkkipilareiden käyttö- kelpoisuutta pehmeiden, vedenkylästämiien maapohjien konsolidaation nopeuttamiseen ja kantavuuden parantamiseen. Pääosa suositusten pohjana olevista tutkimuksista tehtiin Suomessa Helsingin seudulla. Myös muita kokemuksia teollisuus- ja asuntoalueiden rakentamisesta pehmeille maapohjille hyödynnettiin suositusten laadinnassa. Esi- tetään myös suosituksia turvemaapohjien parantamiseksi esikuormi- tuksella ja pystyöjituksella.</p>		
<p>Toimintayksikkö</p> <p>Geotekniikan laboratorio, Lämpömiehenkuja 2 B, 02150 Espoo</p>		
<p>ISSN ja avainnimeke</p> <p>0358-5085 Tiedotteita - Valtion teknillinen tutkimuskeskus</p>		
<p>ISBN</p> <p>951-38-2186-2</p>	<p>Kieli</p> <p>engl., venäjä, suom. tiiv.</p>	
<p>Luokitus (UDK)</p> <p>624.137/.138</p>	<p>Avainsanat</p> <p>consolidation, stabilization, water satu- rated soils, preloading, vertical drainage, deep stabilization, lime columns, recommenda- tions, subsoils, compactions</p>	
<p>Myynti</p> <p>Valtion painatuskeskus</p> <p>Kirjakaupat: Annankatu 4 Eteläesplanadi 4 00100 Hki 10 00100 Hki 10 Puh. (90) 17341 Puh. (90) 662801</p> <p>Postimyynti: PL 516, 00101 Helsinki 10 Puh. (90) 539011</p>	<p>Sivuja</p> <p>83 s.</p> <p>Lisätietoja</p>	<p>Hinta</p> <p>42 mk</p>



Vuorimiehentie 5
SF-02150 Espoo 15, Finland
phone internat. + 358 0 4561
telex 122972 vttha sf

VTT Research Notes 389 FI+VTTTIED-84/389

Date
November 1984

Project number
321-4

Authors	Name of project	
	Commissioned by Finnish-Soviet Commission for Scientific and Technological Cooperation	
<p>Titel</p> <p>RECOMMENDATIONS FOR THE RATIONAL METHODS OF WEAK WATER-SATURATED SUBSOILS COMPACTION BY VERTICAL DRAINS IN BASES AND FOUNDATION ENGINEERING</p>		
<p>Abstract</p> <p>The results of the team investigations which were carried out by Soviet and Finnish specialists on the consolidation and stabilization of weak water-saturated soils by using preloading, vertical drainage and deep stabilization by lime columns are the basis for the recommendations. The main part of the investigations has been performed in Finland, in Helsinki, alongside with the experience of subsoil consolidation and stabilization by vertical drainage and installation of lime stabilized columns, gained by Soviet and Finnish specialists when developing new territories for dwellings and industrial areas on weak water-saturated subsoils, while preparing these recommendations. Also the experience gained of the development of peat areas has been applied to this recommendations.</p>		
<p>Activity unit Geotechnical Laboratory, Lämpömiehenkuja 2 B, SF-02150 Espoo, Finland</p>		
<p>ISSN and key name 0358-5085 Tiedotteita - Valtion teknillinen tutkimuskeskus</p>		
<p>ISBN 951-38-2186-2</p>	<p>Language English, Russian, Finnish abstract</p>	
<p>Class (UDC) 624.137/.138</p>	<p>Key words consolidation, stabilization, water saturated soils, preloading, vertical drainage, deep stabilization, lime columns, recommendations, subsoils, compactions</p>	
<p>Sold by</p> <p>Government Printing Centre P.O. Box 516 SF-00101 HELSINKI 10 phone internat. +358 0 539011</p>	<p>Pages 83 p.</p>	<p>Price FIM 42</p>
	<p>Note</p>	

